

**Philippe Louvel • Pierre Ezerzere • Philippe Jourdes
Fabienne Robin • Gaël Khimeche**

SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES EMBARQUÉS ET TRANSPORTS

**Automobile, ferroviaire, aéronautique
et espace**

4^e édition

DUNOD

Direction et conception graphiques de la couverture :
Nicolas Wiel – Elizabeth Riba (graphiste)

Mise en pages : Nord Compo

© Dunod, 2006, 2015, 2021, 2025

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-089050-7

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	IX
INTRODUCTION	XI

A

Fondamentaux

1 • Généralités et notions de base	3
1.1 Définitions	3
1.2 Les différentes familles de systèmes embarqués	7
1.3 Les capteurs utilisés	16
2 • Ingénierie au niveau système	25
2.1 Généralités	25
2.2 Prestations fonctionnelles et quantifiées	26
2.3 Sûreté de fonctionnement	32
2.4 Mode nominal, modes dégradés, diagnostic	39
2.5 Architecture communication et bus	42
2.6 Sources d'alimentation	47
2.7 Profil de mission	50
2.8 CEM et perturbations électromagnétiques	54
2.9 Intégration des systèmes	60
3 • Ingénierie au niveau des composants	65
3.1 Généralités	66
3.2 Températures et environnement thermique	67
3.3 Sollicitations mécaniques, vibrations et chocs	69

3.4 Fluides	71
3.5 Compatibilité électromagnétique	73
3.6 Cas des logiciels	75
3.7 Plan de validation	79

B

Applications

4 • Systèmes embarqués ferroviaires	83
4.1 Historique du développement des fonctions	84
4.2 Captage électrique et distribution	87
4.3 Freinage	92
4.4 Signalisation	111
4.5 Traction	123
4.6 Éclairage, chauffage & climatisation et portes	128
4.7 Systèmes de communication (interne et externe)	130
4.8 Enregistreur d'événements	137
4.9 Pendulation active	137
5 • Systèmes embarqués automobiles	139
5.1 Historique du développement des fonctions	139
5.2 Génération électrique, distribution, réseau de bord, batterie	142
5.3 Motorisation hybride	149
5.4 Motorisation électrique	171
5.5 Motorisation thermique conventionnelle et contrôle moteur	176
5.6 ABS, ESP	183
5.7 Système de protection airbags	191
5.8 Directions assistées	194
5.9 Antidémarrage, télécommande des portes, accès et démarrage sans clé	200
5.10 Essuyage, éclairage extérieur	211
5.11 Climatisation, tableau de bord, autoradio, navigation	219
5.12 Transmissions et boîtes automatiques	225
5.13 Autres systèmes d'aide à la conduite (surveillance de la pression des pneus, aide au parking...)	228
5.14 Bus de communication	237
5.15 Le dihydrogène	237

6 • Systèmes embarqués aéronautiques	253
6.1 Historique du développement des fonctions électriques et évolution des systèmes	254
6.2 Génération électrique et distribution	259
6.3 Génération énergie hydraulique	266
6.4 Instrumentation à bord	269
6.5 Communications externes et internes	275
6.6 Commandes des gouvernes de vol	281
6.7 Contrôle des turboréacteurs	299
6.8 Pressurisation, chauffage et climatisation	310
6.9 Contrôle de manœuvre des trains d'atterrissage	313
6.10 Système des freins	323
6.11 Gestion du carburant	328
6.12 <i>Flight recorders</i> , dégivrage, gestion des portes et autres dispositifs	333
6.13 Et si l'avenir c'était...	338
7 • Systèmes spatiaux embarqués	351
7.1 Introduction	351
7.2 Système de navigation (Guidage, Navigation et Contrôle) : situer – guider – piloter	355
7.3 Système de propulsion	357
7.4 Système de contrôle d'attitude	363
7.5 Système pyrotechnique : allumage – séparation – destruction	366
7.6 Système électrique	368
7.7 Perspectives	369
CONCLUSION	371
Synthèse	371
Enjeux et perspectives	372
GLOSSAIRE	375
Général	375
Aéronautique	375
Automobile	376
Ferroviaire	377
Ressources documentaires	379
Index	383

AVANT-PROPOS

Devant la multiplication des systèmes embarqués dans le monde moderne, notamment dans les moyens de transport, il nous est apparu indispensable de faire un état des lieux et de proposer un ouvrage traitant des systèmes électriques et électroniques embarqués.

Fort de deux éditions, nous avons cherché à étoffer cet ouvrage en ajoutant deux aspects aux secteurs déjà couverts.

Le premier, qui reste l'un des plus grands défis que s'est fixé l'humanité, est de conquérir l'espace. Les systèmes embarqués, leur niveau d'automatisation et les contraintes qu'ils subissent y sont poussés à leur paroxysme.

Le second aspect, que le lecteur retrouvera tout au long de l'ouvrage, est le lien étroit qui existe entre transport et environnement. Cette prise de conscience, essentielle, a eu un impact grandissant sur notre manière d'appréhender les transports, de leur conception à leur utilisation.

Cet ouvrage s'intéresse donc aux quatre secteurs principaux des transports modernes, à savoir le transport guidé (trains), les automobiles, les avions de ligne et le secteur spatial.

Par ailleurs, cet ouvrage propose plusieurs niveaux de lecture, avec des vues synthétiques d'une part, mais aussi des revues détaillées des solutions d'autre part, tant sur les aspects système et les codes embarqués associés, que sur les aspects composants.

Cet ouvrage s'adresse à tous les ingénieurs débutants qui se « font les dents » sur les systèmes embarqués, quels que soient leurs domaines d'activité. Il s'adresse également à des ingénieurs plus chevronnés, qui ont envie (ou besoin) de faire un point et de regarder ce qu'il se passe dans des secteurs voisins.

Bien sûr, cet ouvrage pourra aussi être utile à tous les intervenants qui gravitent autour du développement et de la maintenance des systèmes embarqués : les responsables qualité, les responsables process, les responsables logistique, les acteurs des services commerciaux et après-vente.

En outre, ce sera un ouvrage de référence pour les professeurs, les étudiants et les élèves-ingénieurs.

À l'heure où le transport ferroviaire devient un enjeu de société et d'urbanisation, où les commandes électriques dites *by wire* ont envahi l'automobile, où l'aéronautique cherche à se décarbonner et où l'espace reste à conquérir, nous vous invitons à vous plonger dans cet ouvrage pour en ressortir grandis et capables d'appréhender les défis techniques d'aujourd'hui et de demain !

INTRODUCTION

Il est difficile d'imaginer ce que serait le monde du XIX^e siècle sans le transport. Ce fut l'une des révolutions majeures du XX^e siècle et l'un des piliers de l'avancée humaine.

Le transport touche tous les aspects de notre vie, qu'il soit terrestre pour nos déplacements quotidiens, aérien pour relier les différentes nations du monde ou même spatial, nous permettant de communiquer d'un bout à l'autre de la planète. Le monde des transports a connu ces dernières années une formidable expansion et a contribué significativement à la facilitation des échanges, de biens et de personnes, avec l'impérieuse nécessité d'être sûr et intégré à l'environnement.

Le présent ouvrage fait la lumière sur un domaine en pleine évolution, qui a accompagné les récents développements de ces moyens de transport : les systèmes électroniques embarqués.

Il s'appuiera en particulier sur la description plus détaillée des systèmes embarqués dans les domaines suivants :

- le ferroviaire ;
- l'automobile ;
- l'aéronautique ;
- et, enfin, le spatial.

Ceci étant, l'ouvrage évoquera d'autres secteurs comme les engins militaires, de travaux publics ou encore les appareils de communication nomades.

Comme pour tout secteur économique marchand soumis à une concurrence devenue mondiale, les acteurs individuels ou collectifs (particuliers et entreprises) utilisant les transports en général exercent sur le marché une « influence » par les choix qu'ils font en achetant biens et/ou services. Par conséquent, les attentes clients sont au cœur du développement des nouveaux produits ou services liés aux transports, en particulier :

- la **sécurité**, qui touche à l'aspect le plus critique et le plus subjectif. Même si le nombre d'accidents par voyageur et par nombre de kilomètres parcourus est un critère reconnu, il n'en reste pas moins que les accidents ayant des conséquences catastrophiques (nous reviendrons sur cette notion plus loin) marquent les esprits, même si le taux d'accidents est très faible ;
- la **sûreté**, à savoir, l'ensemble des dispositions techniques, des moyens humains et des mesures d'organisation internes et externes destinés à prévenir les actes de malveillance venant de l'intérieur ou de l'extérieur, et à atténuer leurs conséquences. Les événements de la fin du XX^e siècle et ceux tristement

- célèbres du début du XIX^e rappellent à quel point les systèmes jouent un rôle capital pour empêcher des détournements, voire des attentats, liés à l'utilisation de ces transports ;
- le **confort**, qu'il soit lié à l'ergonomie, aux bruits ou aux services proposés. Le client final en attend toujours plus, que ce soit dans sa propre voiture ou lors d'un voyage en train ou en avion. Ainsi, on peut aujourd'hui accéder à Internet aussi bien depuis sa voiture que depuis un avion volant à 35 000 ft ;
 - la **rapidité**, qui permet de contracter le temps mis à accéder à sa destination et ainsi de profiter de l'adage « le temps, c'est de l'argent » ;
 - la **rentabilité**, très assujettie aux entreprises privées. Les systèmes électroniques embarqués permettent de réduire les coûts d'utilisation et de maintenance des véhicules ;
 - et enfin, l'**écoefficience**, c'est-à-dire la capacité des transports à apporter de la valeur tout en maîtrisant leur impact sur l'environnement. Cela couvre, sans être exhaustif : la réduction de la consommation au travers de la réduction du poids (ayant impact direct sur la consommation en énergie – les efforts colossaux faits sur l'allègement des futurs avions sont symptomatiques de la tendance à employer toujours plus de nouveaux alliages d'aluminium et matériaux composites), la maîtrise des émissions de polluants et des nuisances sonores et jusqu'à l'atténuation de l'impact sur nos paysages et terres cultivables.

Les contraintes réglementaires sont le reflet de cette prise de conscience collective et sociétale dans les dernières décennies, ne mettant plus seulement l'accent sur la sécurité et la sûreté mais aussi sur :

- la pollution atmosphérique/les émissions (les normes Euro VI sont entrées en application pour les automobiles) ;
- le bruit (un critère important et une des contraintes majeures dans le développement des récents réacteurs/nacelles équipant l'A320neo ou l'A350) ;
- la recyclabilité, qui vise à assurer que le fabriquant de tout dispositif s'engage à développer un processus de recyclage et cela depuis le tout début de la conception ;
- l'innocuité des matériaux, contrainte qui a un impact un peu partout dans le développement des produits : le cadmium, le mercure et le plomb sont soumis à des règles d'utilisation et de déclaration toujours plus strictes.

Par ailleurs, les progrès technologiques sont des facilitateurs qui conditionnent certaines avancées techniques. Dans le domaine des systèmes électriques/électroniques embarqués, on peut citer :

- le transistor (années 1960) : cette découverte fondamentale a créé un immense champ de nouvelles possibilités, parmi lesquelles les systèmes embarqués pilotés. On peut citer les MOS (*Metal-Oxide-Semiconductor*) et les IGBT (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*) qui permettent d'amplifier ou de commuter des signaux ;
- les microprocesseurs (années 1980) : l'avènement du numérique a décuplé les possibilités de l'électronique analogique ou numérique ;
- les réseaux de communication multiplexés (années 1990) : ils ont été et sont toujours un facteur d'accroissement des fonctions et de rationalisation des architectures ;

- les communications sans fil : elles sont désormais indispensables au guidage et à la navigation, ainsi que pour des fonctions de confort (kits mains libres en tous genres) ;
- les piles et les accumulateurs d'énergie électrique (nerf de la guerre des véhicules électriques !)
- et, d'une façon générale, la miniaturisation des composants et circuits électroniques, qui rend possible l'intégration de fonctions intelligentes au contact des capteurs ou actionneurs (nous aurons l'occasion de reparler de la « mécatronique », puisque c'est de cela qu'il s'agit).

Il est important de rappeler ici la croissance extraordinaire qu'ont connue les fonctions électriques/électroniques embarquées dans les moyens de transport.

Nous voyons sur le graphique de la *figure 0.1* que l'avènement des microprocesseurs dans les années 1980 a été un catalyseur du développement des systèmes embarqués. Les réseaux de communication multiplexés ainsi que le boom des communications sans fil ont encore déclenché un accroissement des systèmes dans les années 1990. Ainsi, un avion moderne a plus de 60 fonctions électriques/électroniques principales que nous aurons l'occasion de détailler dans la 3^e partie de l'ouvrage. L'automobile moderne en a presque autant, tandis que le train évolue un peu moins vite et nous aurons également l'occasion de détailler leurs principaux systèmes plus loin.

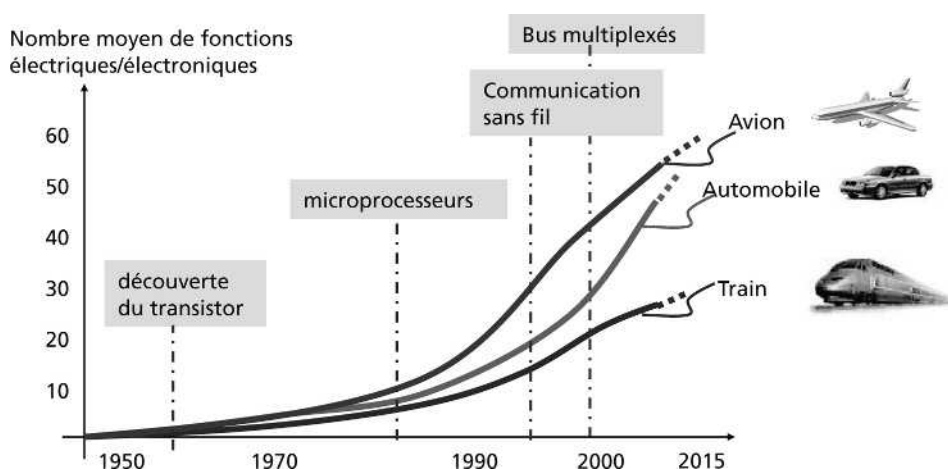


Figure 0.1 – Évolution du nombre de fonctions électriques en fonction du temps.

La croissance des fonctions électriques/électroniques provient en partie de la transformation de systèmes dont le pilotage était auparavant plus rudimentaire et ne faisait pas appel à de l'électronique mais à des systèmes à commande « mécanique ». Les systèmes nouveaux qui remplacent progressivement les anciens voient l'apparition de commandes faisant appel à de l'électronique, le cas le plus connu étant probablement la commande des gouvernes de vol sur les avions (nous y reviendrons évidemment en détail plus loin).

L'avantage crucial qu'amène l'électronisation des commandes est la souplesse, la capacité à prendre en compte divers paramètres, la capacité à s'adapter à certaines dérives de paramètres, à la modularité, etc. Il va sans dire que la réduction constante des coûts de l'électronique renforce l'attractivité des systèmes à pilotage électronique.

Une notion importante dans la compréhension des transport est aussi une différence essentielle entre ces domaines, il s'agit du cycle de renouvellement ou cycle de vie de ces produits. Le graphique de la *figure 0.2* illustre les durées respectives du cycle de vie de plusieurs produits types.

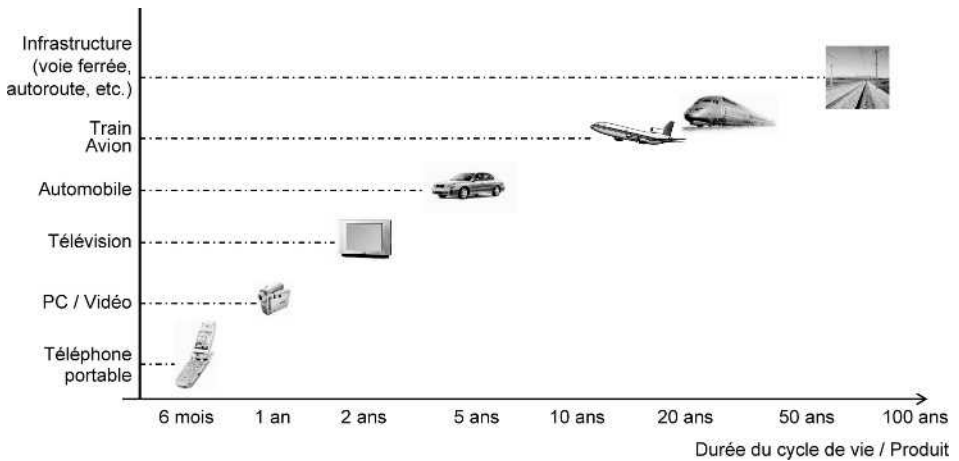


Figure 0.2 – Cycle de vie des produits.

Nous voyons dans le graphique de la *figure 0.2* que l'automobile a des cycles plus courts que l'avion et le train et ceci s'explique par la pression concurrentielle exacerbée sur un marché très ouvert et les effets de mode (achat « coup de cœur »). À l'inverse, les investissements portant sur les infrastructures sont faits à un terme d'une cinquantaine d'années *a minima*. On verra que ce point interviendra à l'ordre 1 notamment pour le domaine ferroviaire où les interactions entre matériel embarqué et infrastructure sont nombreuses. Là encore, l'électronique embarquée joue un rôle essentiel, car elle permet de réduire le cycle de développement, d'offrir des capacités de correctifs lors de la mise au point et, même après la mise en service, de permettre l'évolution de produits vieillissants. Ce fut le cas de l'A320neo (2015) qui, partant de l'A320 (1988) à commandes de vol électriques, à pu/su s'adapter aux nouveaux moteurs pour le faire entrer dans le nouveau millénaire !

Un autre enjeu important est la croissance des logiciels qui sont présents dans les systèmes de commande embarqués. Tout comme leur criticité, leur taille ne cesse d'augmenter comme le montre le graphe de la *figure 0.3*. Nous verrons plus loin quelles méthodes sont utilisées pour maîtriser la problématique de leur développement.

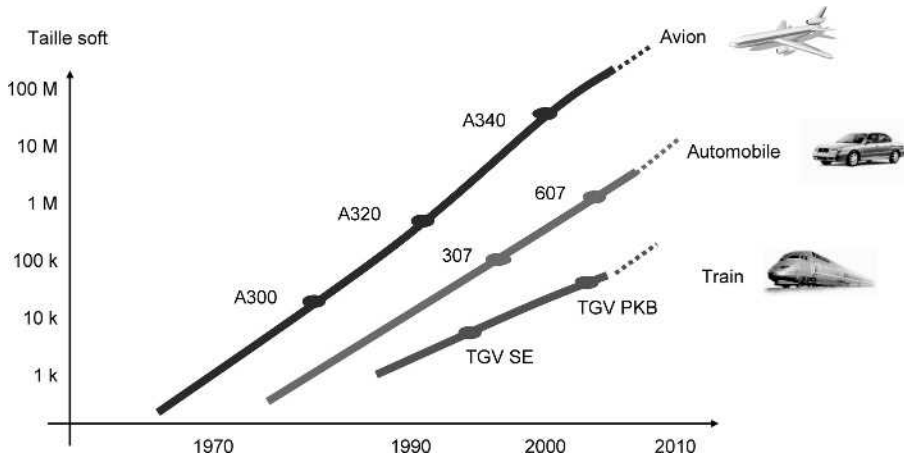


Figure 0.3 – Taille des logiciels dans les systèmes embarqués.

Le développement d'une multitude de systèmes embarqués amène les concepteurs vers de nouvelles problématiques :

- l'optimisation de l'**architecture globale** et la communication **intersystèmes** ;
- l'intégration et les validations pour la certification (partie montante du cycle en « V »).

La situation est loin d'être aussi simple que ne le montre le schéma bien connu du cycle de développement en « V » pour un système « simple » (cf. *figure 0.4*).

Nous aurons bien sûr l'occasion de développer ce thème dans la suite de l'ouvrage. Nous aurons tout loisir de découvrir que, en réalité, dans un véhicule de transport moderne, il y a une multitude de systèmes avec leurs cycles en « V » associés, qui peuvent comporter des strates supplémentaires, et que tous ces systèmes ont de profondes interrelations ou interdépendances.

L'optimisation de l'architecture est désormais un enjeu considérable et nous le verrons plus concrètement dans le cas des avions et des automobiles (cf. partie B, chapitres 5 et 7). L'apparition, puis la généralisation, de standards de communication sur bus multiplexés aide pour beaucoup à cette optimisation.

L'autre enjeu très important concerne les tests d'intégrations et tous les essais de qualification qui sont nécessaires et suffisants pour arriver à une « certification » du système embarqué, sans oublier la vérification des redondances, cette vérification nécessitant un processus particulièrement rigoureux.

L'ouvrage s'appuie sur les trois principaux modes de transports qui n'ont cessé de croître, si l'on considère le nombre de « voyageur. kilomètres » en fonction du temps. Comme on le voit sur le graphique de la *figure 0.5*, le transport par train a été le premier moyen de déplacement de masse. Entre les deux guerres mondiales, l'automobile a émergé puis n'a cessé de se renforcer. Le transport aérien, quant à lui, n'a vraiment « décollé » qu'à partir des années 1960. En ce qui concerne les dernières tendances, on notera sur le graphique (*figure 0.5*) un petit tassement

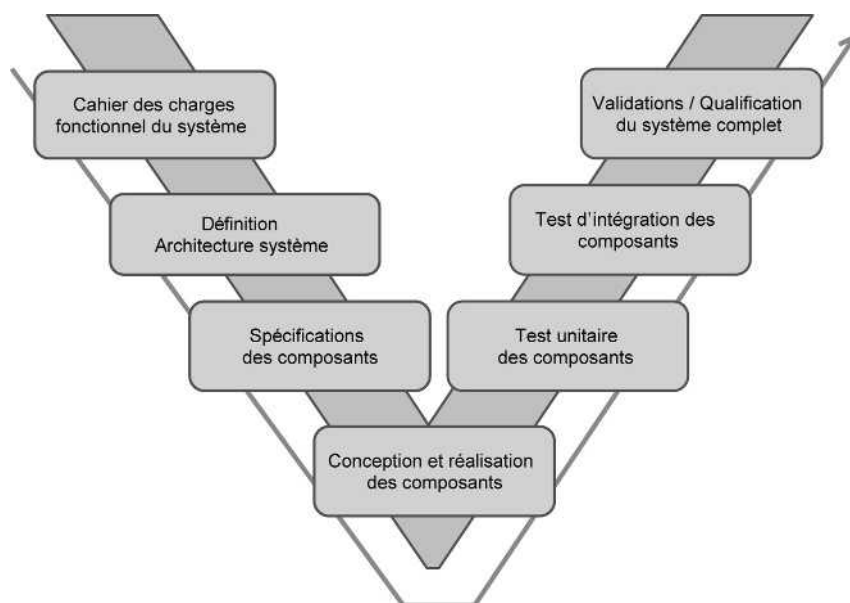


Figure 0.4 – Cycle de développement type d'un système « simple ».

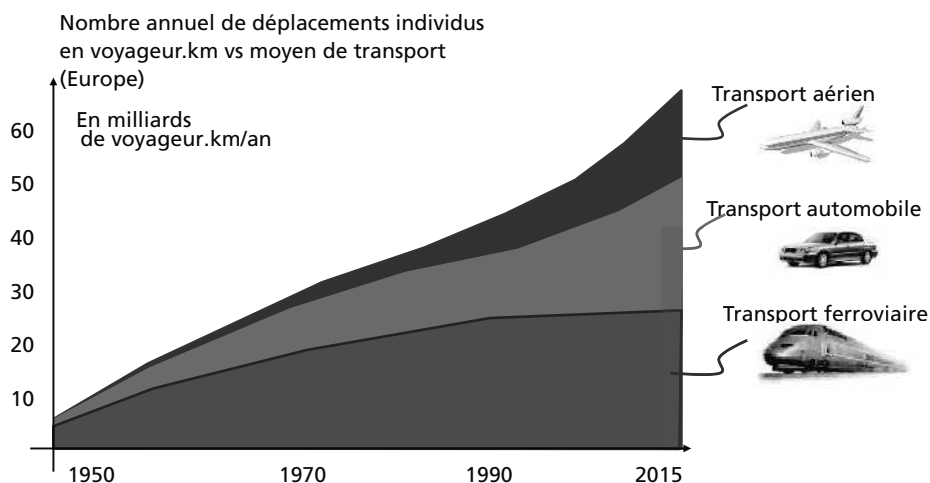


Figure 0.5 – Évolution et répartition des modes de transports en fonction du temps.

relatif du train aux dépens de l'avion et de l'automobile, dans un contexte d'accroissement spectaculaire du nombre de déplacements.

Cet ouvrage est destiné aux techniciens, ingénieurs et autres chefs de projet qui travaillent sur des systèmes embarqués, mais aussi au grand public. Ainsi, cet

ouvrage permettra de mettre les projecteurs sur des aspects de l'électronique embarquée qui peuvent toucher l'utilisateur final :

- Pourquoi certaines automobiles sont-elles sujettes à des dysfonctionnements ? (qui n'a pas entendu parler par exemple de la controverse autour du régulateur de vitesse ?)
- Pourquoi éteindre son téléphone portable dans l'avion, pourquoi les passagers sont ils « briefés » sur le masque à oxygène ?
- Pourquoi un petit incident sur une voie ferrée peut conduire en cascade à tant de retards dans les transports ferroviaires ?

Pour compléter les informations de cette introduction, le lecteur pourra se reporter aux références [1], [2] et [24].

Maintenant passons au vif du sujet : le corps principal de l'ouvrage est architecturé en deux parties :

Dans la partie A, nous aborderons les aspects fondamentaux et les notions de base des systèmes électroniques embarqués, la typologie des différents systèmes rencontrés, leurs règles de conception, le choix des composants principaux (capteurs, actionneurs, faisceau), les cahiers des charges d'environnement type et les problèmes usuels rencontrés en développement.

Dans la partie B, nous passerons en revue de façon quasi-systématique chacun des systèmes embarqués présents respectivement dans le ferroviaire, l'automobile, l'aéronautique et le spatial.

A

Fondamentaux

1 • GÉNÉRALITÉS ET NOTIONS DE BASE

A

FONDAMENTAUX

1.1 Définitions

On ne peut parler d'électronique embarquée sans parler du système embarqué qui va être piloté par cette électronique. En effet, l'électronique n'a pas de justification en soi, mais c'est un moyen pratique et souple mis à la disposition et au service des fonctions du véhicule, pour le confort, la sécurité ou tout autre bénéfice pour les utilisateurs dudit véhicule.

Il convient dans un premier temps de poser les premières définitions d'un système embarqué. Les éléments essentiels qui vont caractériser un système sont en particulier :

- son périmètre ;
- sa ou ses sources d'énergies ;
- les prestations qu'il doit assurer en qualité et quantité ;
- ses modes de défaillances et ses modes dégradés.

Le périmètre d'un système embarqué rassemble tous les constituants concourant à effectuer les prestations attendues par ce système. Il existe cependant, comme on va le voir, plusieurs sortes de systèmes embarqués, certains étant relativement simples et limités à un petit périmètre, d'autres beaucoup plus complexes et/ou étendus.

Si on prend le cas d'un système relativement simple, le périmètre peut se matérialiser de la façon suivante, sous la forme d'un schéma de principe (le terme « synoptique » est un équivalent) qui est présenté en *figure 1.1*.

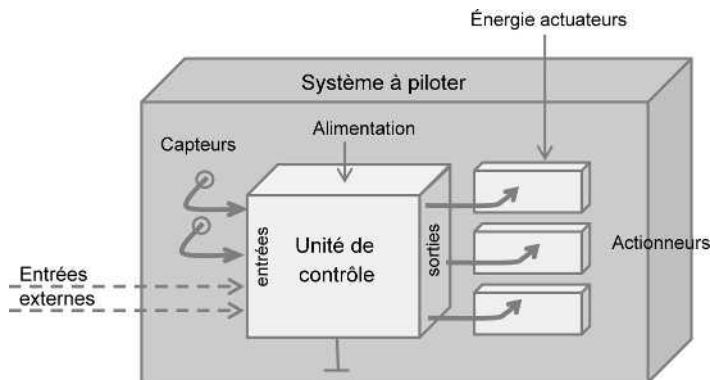


Figure 1.1 – Schéma de principe d'un système simple.

Le système peut être de différentes natures (électropneumatique, électromécanique...) comme nous le verrons plus loin. On voit sur le schéma que l'unité de contrôle est en interaction avec le système à piloter au moyen :

- des entrées/capteurs simples ;
- des sorties/actuateurs simples ;
- des capteurs intelligents le cas échéant ;
- des actuateurs intelligents le cas échéant.

Notons au passage qu'on emploie indifféremment les termes « actionneur » ou « actuateur ». Par ailleurs, l'unité de contrôle doit être correctement alimentée, et peut aussi utiliser des entrées externes. Le système considéré peut nécessiter des communications avec des systèmes voisins, soit par lignes de communication filaires (bus multiplexé) soit par voie hertzienne (*wireless communication*). Ces autres systèmes sont alors naturellement considérés comme étant hors périmètre par rapport au système considéré. Ce qui conduit au synoptique présenté en *figure 1.2*.

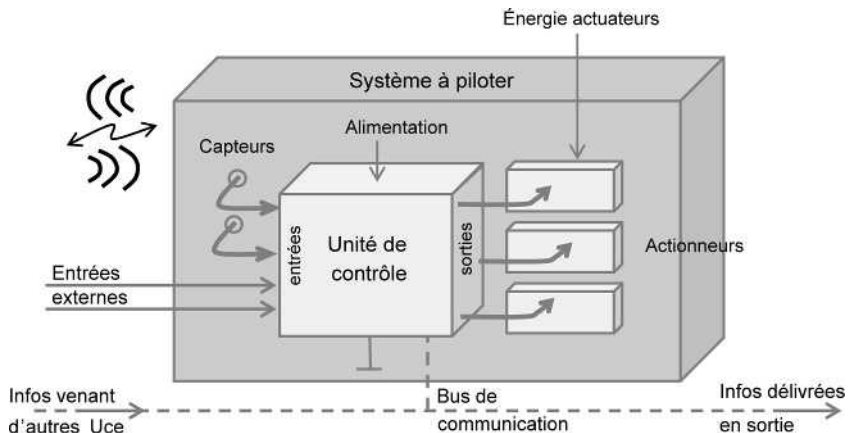


Figure 1.2 – Schéma de principe d'un système simple communicant.

Dans certains autres cas, le périmètre de ce que l'on entend par « système » peut être étendu et « disséminé » géographiquement. Dans ce cas, on peut avoir plusieurs unités de contrôle distinctes qui communiqueront par un bus (typiquement la majorité des systèmes dans les trains, mais aussi la gestion des réservoirs de carburant dans un avion par exemple). On parle alors de système « distribué » (*figure 1.3*).

Un second élément essentiel qui définit un système embarqué est la source d'énergie qu'il utilise. Nous verrons dans les sections suivantes qu'un système embarqué peut être, pour ne citer que les plus répandus :

- un système électrohydraulique ;
- un système électropneumatique ;
- un système électrothermodynamique ;
- un système électrochimique ;