

# Matériel et logiciel dans les systèmes embarqués

Ce cours est un extrait de "**Linux embarqué, Comprendre, développer, Réussir**" Gilles Blanc ingénieur en informatique industrielle et expert en *Linux embarqué*

## I. Introduction

Ce chapitre commence par présenter les composants matériels typiques d'un système embarqué. Il présente par la suite les différents types de processeurs ainsi que les différents types de mémoire flash. Il présente aussi les différents formats de données utilisés. Enfin, il présente les systèmes d'exploitation et les outils libres utilisés dans les systèmes embarqués.

## II. Composants matériels typiques

Un système embarqué est typiquement composé de :

- Un CPU (Central Processing Unit) pour les calculs et les entrées/sorties, autour duquel tout est organisé. Le CPU peut avoir un ou plusieurs cœurs et il peut avoir une gestion optimisée de la consommation électrique.
- Une RAM de quelque Kilo à quelque Méga (généralement inférieur à 256 Mo).
- Un stockage de données sur différents supports (généralement de la mémoire flash).
- Les entrées/sorties à usage général GPIO (General Purpose Input Output) sous la forme de paires de pins capable de faire passer ou non du courant (de 2v à 5v), soit en entrée (détection) soit en sortie (commande).
- Un bus de communication I2C (Inter Integrated Circuit) pour les communications assez lentes.
- Un port JTAG (Joint Test Action Group) accédant directement aux fonctionnalités bas niveau du CPU : il devient ainsi possible de structurer son fonctionnement, de déboguer un logiciel par des points d'arrêts matériels ou encore de programmer de la mémoire flash.
- Un bus UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) RS-232 ou port série, supporté par les CPU mais sa taille est encombrante.
- Un bus USB (Universal Serial Bus) avec ses versions 1.1, 2.0 et 3.0.
- Un lecteur de carte SD : il permet d'étendre les capacités de stockage mais aussi de démarrer un système entier dessus (cas de Raspberry).
- Un port Ethernet ou RJ45 pour la connexion réseau.

## III. Les processeurs

Le choix du processeur est une étape critique dans la construction d'un système embarqué. En fait le processeur est un élément central autour duquel fonctionne tout le système. Quatre critères importants à prendre en compte lors du choix d'un processeur :

- Son architecture : 8 bits, 16 bits, 32 bits, 64 bits
- Sa vitesse : la fréquence du processeur doit garantir une vitesse qui permet de faire fonctionner le système embarqué en respectant ses contraintes temporelles.
- Sa consommation (utilisation de la batterie).
- Son coût : un coût très élevé fait augmenter le coût de revient du système embarqué.



Parmi les processeurs utilisés dans l'embarqué dans ordre décroissant de leur présence sur le marché :

- ARM (développés par ARM Ltd) ce sont des processeurs de type RISC 32 et 64 bits. Ils sont utilisés essentiellement pour des outils portables de communication et de multimédia qui ont une forte communication avec l'utilisateur (Cortex A7, A9, A15).
- X86 (PC, AMD, et Atom développés par Intel) ce sont des processeurs de type CISC utilisés dans plusieurs projets qui ne sont pas déjà adressés par des CPU spécialisés. Les processeurs Atom tentent à être spécialisés essentiellement pour des appareils portatifs dans l'industrie et pour les réseaux.
- Power PC : ce sont des processeurs de type RISC principalement utilisés dans les infrastructures de communication réseau à fort trafic soutenu.
- MIPS (Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages) : ce sont des processeurs de type RISC utilisés par la quasi-intégralité des routeurs et des modems.
- SH4 (Super Hitachi) : ce sont des processeurs de type RISC réputés pour leur solidité, ils sont utilisés dans les set-top box de type décodeurs (satellite, TNT (Télévision Numérique Terrestre), câble) ou certaine platine DVD/DIVX.
- FPGA/ASIC/DSP

## IV. Les mémoires flash

La technologie flash est très particulière :

- L'organisation du stockage se fait par bloc : une écriture implique d'effacer tout un bloc (mettre tous les bits à 1) avant de fixer les données modifiées stockées un moment en RAM.
- Le nombre de cycle d'écriture par bloc limite sa durée de vie.
- Il existe de la flash NOR et de la flash NAND :
  - La NOR est lente en écriture mais permet un adressage aléatoire et rapide sur n'importe quelle position. Elle permet aussi le XIP (eXecute In Place) sans avoir à recopier dans la RAM.
  - La NAND est plus rapide en écriture mais ne dispose que d'un accès séquentiel aux données.
- La flash NOR est bien de meilleure qualité mais beaucoup plus chère que la NAND. La NAND permet donc de disposer de bien plus d'espace de stockage. Certaines plateformes matérielles proposent simultanément du NOR et du NAND (par exemple 1 Mo de NOR et 64 Mo de NAND).
- La représentation mémoire de la flash est sur le même plan d'adressage que la RAM, ce qui permet le XIP sur de la flash NOR si le noyau est configuré pour cette utilisation et si le système de fichier supporte cette fonctionnalité.

## V. Les formats de données

La représentation des données dans un système embarqué est un enjeu important dans le stockage et l'échange de données. Il existe des formats de données propriétaires et d'autres ouverts. On s'intéresse dans ce paragraphe aux formats ouverts. Un format ouvert est un format clairement défini par la loi (standard ouvert). Parmi les avantages des formats ouverts :

- La pérennité : il est possible de récupérer les données enregistrées d'un appareil à un autre qui utilise le même format ou qui respecte les mêmes standards. De plus, lors de l'évolution d'un système, la rétrocompatibilité est garantie.
- L'interopérabilité : possibilité de faire fonctionner ensemble des appareils pour réaliser une fonctionnalité.
- Le coût : inutile de redéfinir un format déjà pensé.

Parmi les formats ouverts directement appliqués aux problématiques de l'embarqué :



- En communication applicative :
  - Le protocole XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol) largement utilisé pour du chat et par google dans son application talk. Il permet l'échange de fichier, de la voix sur IP et de faire des visioconférences.
  - L'UPnP (L'Universal Plug and Play) est utilisé pour faire communiquer des appareils multimédias entre eux par streaming (c-à-d sans copie totales des fichiers avant la lecture)
- En audio/vidéo: L'ogg est le nom du principal projet de la fondation Xiph.org dont le but est de proposer des formats et codecs multimédias ouverts, libres et délogés de tout brevet. Il est utilisé par Youtube.
- Pour les images : le SVG (Scalable Vector Graphics), le PNG (Portable Network Graphics) et le MNG (Multiple-image Network Graphics) pour les images animés.
- Pour la compression des données :gzip, bzip2,LZMA, 7z.
- Pour les fichiers textes : le format ASCII
- Pour le 3D : OpenGL.

## VI. Les systèmes d'exploitation

Il existe des systèmes d'exploitation embarqués propriétaires ou commerciaux et des systèmes d'exploitation libres ou communautaires. Parmi les systèmes d'exploitation propriétaires ou commerciaux :

- VxWorks : c'est un système d'exploitation temps réel multitâche développé par la firme Wind River, principalement employé par la recherche et l'industrie (aéronautique, automobile, transport, télécommunication), mais également dans de nombreux systèmes de communication d'entreprise. Il a été employé par la NASA et par l'Agence spatiale européenne sur le satellite PROBA-1.
- LynxOS : est un système d'exploitation temps réel, propriétaire et de style Unix de la société LynuxWorks pour systèmes embarqués. En 1988-89, une version de LynxOS a été réalisée pour l'architecture Intel 80386. Aujourd'hui, LynxOS fonctionne également sur d'autres architectures, telles ARM, PowerPC et MIPS.
- QNX : conçu principalement pour le marché des systèmes embarqués tels que les voitures mais aussi pour les industries et les services médicaux des hôpitaux.
- Microsoft Windows CE (Windows Embedded Compact) : Il utilise un noyau distinct des autres Windows plutôt qu'une version allégée et supporte les architectures processeur Intel x86 et similaires, MIPS (jusqu'à CE 3.0), ARM et aussi Hitachi SH.
- Windows XP Embedded : c'est une version embarqué de Windows XP dans des équipements autonomes (PDA, PC embarqués).

Parmi les systèmes d'exploitation libres :

- eCos : c'est un système d'exploitation embarqué très populaire dans certaines applications simples (compteur d'électricité, kits mains libre) à connectivité Wifi ou Bluetooth.
- RTEMS : répond à des problématiques de temps-réels fortes tel que le domaine spatial.
- TinyOS : un système temps réel dur miniature conçu pour les réseaux de capteurs sans fil.
- NetBSD/OpenBSD : est un système d'exploitation libre de type Unix, dérivé de 4.4BSD. Créé en 1994 par Theo de Raadt, il est issu de la séparation avec NetBSD, le plus ancien des trois autres principaux systèmes d'exploitation de la famille des BSD aujourd'hui en activité. Le projet OpenBSD est réputé pour son intransigeance sur la liberté du logiciel et du code source, la qualité de sa documentation, et l'importance accordée à la sécurité et la cryptographie intégrée [wikipédia].



- Open Solaris/Illumos : est un système d'exploitation UNIX propriétaire développé à l'origine par Sun Microsystems. Ce système s'appelle dorénavant Oracle Solaris depuis le rachat de Sun par Oracle en avril 2009. ILLUMOS est un projet de système d'exploitation libre s'appuyant au départ sur le noyau dit OS/Net (connu comme ON) réalisé dans le cadre du projet OpenSolaris. Le projet Illumos a été annoncé le 3 août 2010 [wikipédia].
- Symbian OS : Symbian OS est un système d'exploitation pour téléphones mobiles et assistants personnels conçu par Symbian ltd [wikipédia].

Il existe aussi des systèmes d'exploitation propriétaires qui se sont rendus fortement compatibles avec les outils libres. Parmi lesquels :

- LynxOS (système d'exploitation que l'on trouve dans des applicatifs militaires),
- VxWorks,
- QNX,
- Darwin (le noyau de MacOS est un système d'exploitation libre et gratuit construit autour du noyau XNU et développé notamment par Apple. Il est dérivé de NeXTSTEP et de BSD),
- Bada : système d'exploitation de Samsung pour téléphones portables.

## VII. Les outils libres

Parmi les projets libres importants utilisés par les industriels :

- GCC (GNU Compiler Collection) : est un front-end (opposé de back-end) donnant accès à des compilateurs pour différents langages (C, C++, Ada). Il comprend :
  - Une implémentation de la bibliothèque C,
  - Des utilitaires de manipulation des binaires générés (binutils),
  - Un débogueur puissant : gdb.
- Busybox : appelé "le couteau suisse" de l'embarqué est un ensemble d'utilitaires indispensables hautement modulaire (sous linux et Windows).
- Eclipse : est devenu en quelques années, grâce à sa possibilité d'intégration de modules (plug-ins), l'IDE (Integrated Development Environment) privilégié.
- SubVersion : pour la gestion des versions.
- Git : c'est un logiciel de gestion de versions décentralisé. C'est un logiciel libre créé par Linus Torvalds, auteur du noyau Linux, et distribué selon les termes de la licence publique générale GNU version 2. En 2016, il s'agit du logiciel de gestion de versions le plus populaire qui est utilisé par plus de douze millions de personnes [wikipédia].
- Redmine : **Redmine** est une application web libre de gestion de projets, développée en Ruby (Ruby est un langage de programmation libre. Il est interprété, orienté objet et multi-paradigme. Le langage a été standardisé au Japon en 2011) sur la base du Framework Ruby on Rails [wikipédia].
- U-Boot : un chargeur d'amorçage (boot loader).
- VideoLan : pour la lecture continue de vidéo sous réseau (Streaming).

## VIII. Le matériel libre

Il n'y a pas que le logiciel qui peut être libre, le matériel peut aussi être libre. Le matériel est dit libre lorsque ses spécifications sont ouvertes. Parmi les serveurs libres : LEON, SPARC et UltraSPARC. Parmi les plateformes libres : Arduino (plateforme de prototypage), BeagleBoard, OpenMoko en téléphonie, Paparazzi pour les drones (Le système Paparazzi permet de faire naviguer de façon autonome, à l'aide d'un GPS, un ou plusieurs micro-drones contrôlés par une station sol fonctionnant sous Linux(wikipédia)), Fab@home et RepRap pour l'impression 3D.

## IX. Les quatre libertés d'un logiciel libre

Un logiciel libre peut offrir quatre libertés :

- Liberté 0 : la liberté d'exécuter le programme pour tout usage même militaire.
- Liberté 1 : la liberté d'étudier le fonctionnement du programme en disposant de son code source.
- Liberté 2 : la liberté de distribuer des copies même en les revendant.
- Liberté 4 : la liberté d'améliorer le programme et de publier ses améliorations.

Le logiciel libre a été à l'origine d'une réorganisation des développeurs appelés « libéristes », sous forme de « communautés » : un projet vivant est soutenu par un regroupement d'intérêt de particulier (étudiants en informatique, graphistes, traducteurs, rédacteurs de documents) et/ou d'entreprises (y compris IBM, Novell, Intel) qui travaillent en groupe sur un logiciel particulier. Le développement libre fonctionne selon la devise « **You want it ? code it !** ».

## X. Les licences

Une licence logicielle est un contrat sous lequel le détenteur (possesseur) des droits (typiquement l'auteur ou la société éditrice) place l'ensemble de son « œuvre d'esprit » pour toute utilisation qui pourrait en être faite. C'est-à-dire que le fait de disposer, d'exécuter, de modifier, d'intégrer, de redistribuer un logiciel est soumis à des droits et des devoirs qui engagent la partie utilisatrice.

Une licence peut être :

- Propriétaire (commerciale) : cette licence est accordée contre paiement et confère certains droits (par exemple droit exécuter mais sans redistribuer).
- Libre (communautaire) : cette licence donne le droit de consulter le code source, de le modifier, de le redistribuer et d'exécuter le programme modifié sans aucune restriction.
- Presque libre ou open source : c'est une licence libre à laquelle s'ajoutent quelques restrictions tel que interdire un usage militaire, utiliser pour le bien et non pas le mal (Use for good, no Evil (JSON)), imposer une clause de publicité (OpenSSL dans le cryptage) ou interdire la modification du code.

La licence commerciale est soumise à un Copyright souvent indiqué par le symbole © qui est l'ensemble des prérogatives exclusives dont dispose une personne physique ou morale sur une œuvre de l'esprit originale [Wikipédia].

Les licences libres sont essentiellement de deux types :

- Les licences à Copyleft : donnent à quiconque la permission d'exécuter le programme, de le copier, de le modifier et d'en distribuer des versions modifiées mais pas d'ajouter des restrictions de son cru. C'est le cas du projet GNU qui utilise la licence GPL.
- Les licences permissives : elles donnent le droit de ne pas distribuer le code source modifié, c'est-à-dire de pouvoir le redistribuer sous une autre licence propriétaire. C'est le cas de la licence BSD (Berkeley Software Distribution) inventé par l'université Berkeley (35000 étudiants et 14000 employés) pour que ces étudiants puissent commencer une activité commerciale indépendante en modifiant le système d'exploitation BSD.

Pour le secteur industriel les licences les plus utilisées sont : GPL, GPLv2, GPLv3, BSD, Apache et EPL.



## XI. Avantages et inconvénients du libre

Parmi les avantages du libre pour l'industrie :

- La matière première (applications, bibliothèques, environnement de développement) est gratuite et très abondante.
- Le code est de qualité, ouvert, documenté et éprouvé sauf exceptions.
- Le support matériel (drivers) est immense et il est aisé d'assurer la compatibilité matérielle. Linux, eCos et les dérivés de BSD supportent les périphériques Wifi et Bluetooth.
- Le support logiciel est aussi très complet (support de la pile du réseau TCP/IP, de l'USB, et de la vidéo).
- Etant donné l'organisation indépendante des projets, l'architecture est modulaire, pensée pour être pérenne (stable, permanente). Le noyau, les bibliothèques et les applications sont distincts, comme des briques identifiables et remplaçables.
- L'aide et la documentation sont assurés par la communauté, ce qui est au centre des préoccupations pour un projet devant durer des années. A ceci s'ajoutent les pages man et info, doxygen (générateur de documentation), FAQ (Frequently Asked Questions), wiki et aussi les forums de discussion, les channels IRC (Internet Relay Chat) et les mailing lists.
- Pas de frais royalistes (sur chaque copie du système embarqué vendu).

Cependant il faut regarder « la face cachée de la médaille » du libre qui comporte plusieurs inconvénients :

- Les coûts cachés (le libre n'est pas gratuit) peuvent être très importants.
- Difficulté de trouver de très bons développeurs et intégrateurs. Ils sont rares et ont un plus fort TJM (Taux Journalier Moyen).
- Difficulté de la phase intégration et importance de son temps.
- L'environnement de développement nécessite toujours, à un moment ou à un autre, de posséder les droits d'administration sur la machine (être super utilisateur, nommé root) ce qui pose des problèmes dans l'administration des grandes entreprises.