

Les systèmes embarqués : une introduction

Patrice Kadionik, Maître de Conférences à l'ENSEIRB (kadionik@enseirb.fr)

Décembre 2005

Introduction

Bienvenue dans le monde des systèmes embarqués !

Ce premier article de ce Hors Série se propose de vous présenter cet univers qui vous est peut-être inconnu mais pourtant si familier et si présent dans votre, dans notre quotidien.

Il a aussi comme objectifs de vous fournir les éléments et notions importantes pour aborder les articles suivants et de tordre le cou aux préjugés, mythes et légendes sur ce sujet des plus passionnants !

Qu'est-ce qu'un système embarqué ? Qu'est-ce que l'embarqué ?

Il suffit de regarder autour de soi au quotidien pour voir et avoir la réponse sous ses yeux.

Vous êtes réveillé le matin par votre radio-réveil ; c'est un système embarqué...Vous programmez votre machine à café pour avoir un bon petit serré ; c'est un système embarqué...Vous allumez la télévision et utilisez votre télécommande ; ce sont des systèmes embarqués...Vous prenez votre voiture et la voix suave du calculateur vous dit que vous n'avez pas mis votre ceinture (pas bien) ; c'est un système embarqué...Vous appelez votre patron avec votre téléphone portable pour signaler que vous serez en retard (pas bien) ; c'est un système embarqué !

On peut continuer à énumérer tous les systèmes embarqués croisés sans le savoir au cours d'une journée.

Bref, les systèmes embarqués nous entourent et nous sommes littéralement envahis par eux, fidèles au poste et prêts à nous rendre service. On en croise des dizaines par jour sans le savoir avant de retrouver son seul et unique PC.

Ils sont donc partout, discrets, efficaces et dédiés à ce à quoi ils sont destinés. Omniprésents, ils le sont déjà et le seront de plus en plus. On parle en fait d'informatique (et d'électronique) diffuse ou *ubiquitous computing/ubiquitous hardware* dans la langue de Shakespeare...

Ils sont bourrés d'électronique plus ou moins complexe et d'informatique plus ou moins évoluée.

Essayons de donner une définition plus précise d'un système embarqué :

Un système embarqué peut être défini comme un système électronique et informatique autonome, qui est dédié à une tâche bien précise.

Il ne possède généralement pas des entrées/sorties standards et classiques comme un clavier ou un écran d'ordinateur. Le système matériel et l'application sont intimement liés, le logiciel embarqué étant enfoui, noyé dans le matériel. Le matériel et le logiciel ne sont pas aussi facilement discernables comme dans un environnement de travail classique de type ordinateur PC.

L'embarqué est un terme plus général qui regroupe plusieurs notions selon le contexte :

- Le marché des systèmes embarqués.
- Les systèmes embarqués par abus de langage.

Caractéristiques principales d'un système embarqué

Les principales caractéristiques d'un système embarqué sont les suivantes :

- C'est un système principalement numérique.
- Il met en oeuvre généralement un processeur.
- Il exécute une application logicielle dédiée pour réaliser une fonctionnalité précise et n'exécute donc pas une application scientifique ou grand public traditionnelle.
- Il n'a pas réellement de clavier standard (Bouton Poussoir, clavier matriciel...). L'affichage est limité (écran LCD...) ou n'existe pas du tout.
- Ce n'est pas un PC en général mais des architectures similaires (x86) basse consommation sont de plus en plus utilisées pour certaines applications embarquées.

De ce constat, on peut voir :

- Qu'un PC standard peut exécuter tout type d'applications car il est généraliste alors qu'un système embarqué n'exécute qu'une application dédiée.
- Que l'interface IHM peut être aussi simple qu'une led qui clignote ou aussi complexe qu'un cockpit d'avion de ligne.
- Que des circuits numériques ou des circuits analogiques sont utilisés en plus pour augmenter les performances du système embarqué ou sa fiabilité.

L'omniprésence des systèmes embarqués dans notre vie est liée à la révolution numérique opérée dans les années 1970 avec l'avènement des processeurs. Les processeurs, de plus en plus rapides, puissants et bon marché ont permis cette révolution et aussi le boom du marché de l'embarqué. Ceci se confirme au travers de la loi empirique de Gordon Moore, cofondateur d'Intel, qui stipule que pour une surface de silicium donnée, on double le nombre de transistors intégrés tous les 18 mois ! La figure 1 montre cette évolution inexorable.

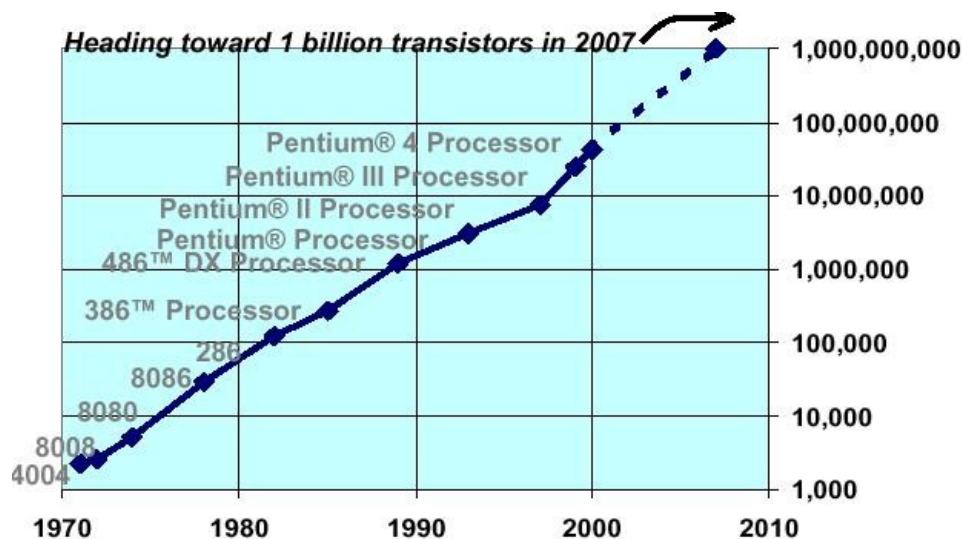


Figure 1 : La loi G. Moore pour les processeurs Intel

En 1999, il a été vendu pour le marché de l'embarqué :

- 1,3 milliard de processeurs 4 bits.
- 1,4 milliard de processeurs 8 bits.
- 375 millions de processeurs 16 bits.
- 127 millions de processeurs 32 bits.
- 3,2 millions de processeurs 64 bits.

A côté de cela, à cette époque, il a été vendu seulement 108 millions de processeurs (famille x86) pour le marché du PC grand public !

Pour 2004, il a été vendu environ 260 millions de processeurs pour le marché du PC grand public à comparer aux 14 milliards de processeurs tout type confondu (microprocesseur, microcontrôleur, DSP) pour le marché de l'embarqué.

Le marché des processeurs pour l'embarqué selon *Electronics.ca Research Network* devrait croître de 6 % en 2005 pour un chiffre d'affaire mondial de 18 milliards USD !

Les chiffres parlent d'eux-mêmes. Le marché du processeur pour les PC grand public n'est que la partie émergée de l'iceberg et n'est rien par rapport au marché de l'embarqué qui est la partie immergée de l'iceberg...

On peut aussi tirer le constat actuel suivant :

- Moins de 2 % des processeurs vendus sont pour le marché du PC contre 98 % pour l'embarqué. On utilise massivement pour le PC grand public le système d'exploitation commercial bien connu.
- Pour les 98 % autres processeurs vendus, on utilisera généralement un autre système d'exploitation. On trouvera ici dans 60 % des cas un système d'exploitation commercial spécialisé pour l'embarqué (VxWorks, QNX...). Pour le reste, il s'agit d'un système d'exploitation *home made* mais de plus en plus optent pour des systèmes d'exploitation libres comme Linux pour l'embarqué.
- Moins de 10 % des processeurs vendus sont des processeurs 32 bits pour près de 31 % du chiffre d'affaire sur les processeurs. Cette part du chiffre d'affaire est estimée à près de 48 % pour 2008 : cela montre la migration rapide vers ces processeurs 32 bits dans l'embarqué, condition nécessaire pour pouvoir mettre en oeuvre Linux.
- Si l'on regarde le prix moyen d'un processeur tout type confondu, on arrive à 6 USD par unité à comparer au prix moyen de 300 USD par unité pour un processeur pour PC. Le marché du processeur pour PC est très faible en volume mais extrêmement lucratif !

Ces quelques chiffres permettent bien de prendre conscience de l'importance du marché de l'embarqué et de mettre fin à l'idée qu'en dehors du marché du PC, point de salut.

Les grands secteurs de l'embarqué concernent les domaines suivants :

- Jeux et calcul général : application similaire à une application de bureau mais empaquetée dans un système embarqué : jeux vidéo, set top box...

- Contrôle de systèmes : automobile, process chimique, process nucléaire, système de navigation...
- Traitement du signal : radar, sonar, compression vidéo...
- Communication et réseaux : transmission d'information et commutation, téléphonie, Internet...

La figure 2 présente les caractéristiques principales d'un système embarqué typique.

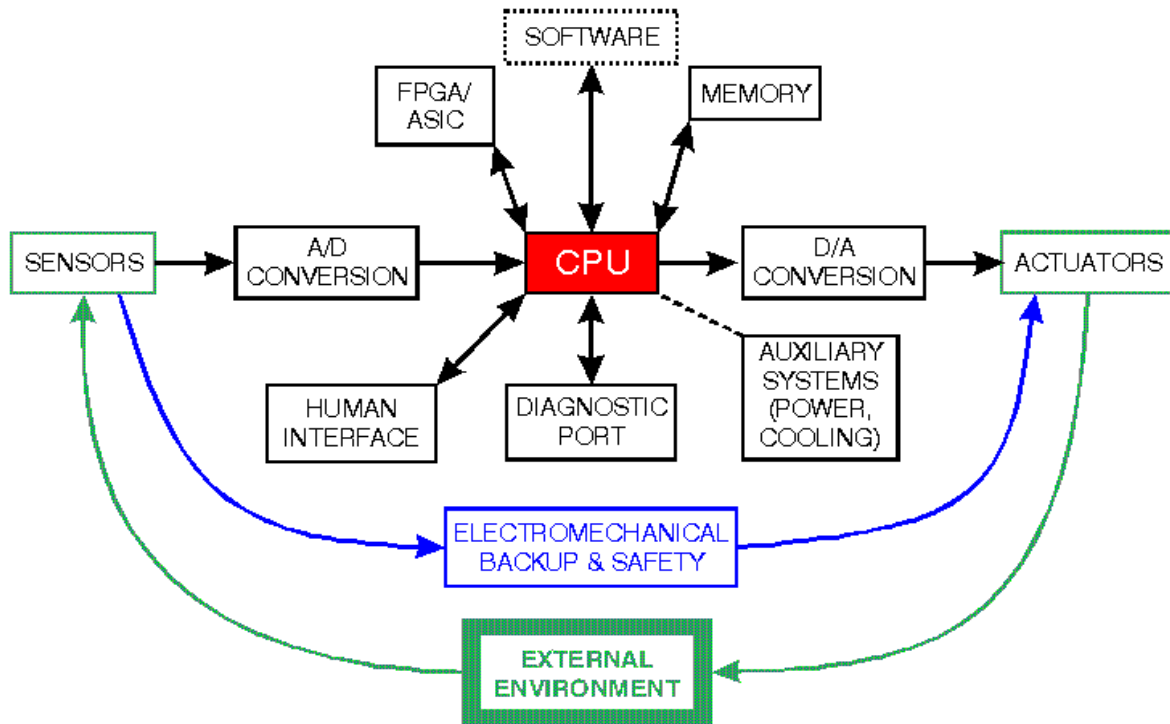


Figure 2 : Système embarqué typique

On retrouve en entrée des capteurs généralement analogiques couplés à des convertisseurs A/N.

On retrouve en sortie des actionneurs généralement analogiques couplés à des convertisseurs N/A.

Au milieu, on trouve le calculateur mettant en oeuvre un processeur embarqué et ses périphériques d'E/S. Il est à noter qu'il est complété généralement d'un circuit FPGA jouant le rôle de coprocesseur afin de proposer des accélérations matérielles au processeur.

On retrouve en fait un beau système d'asservissement entre les entrées et les sorties ! Il est à noter que l'expression la plus simple de cette figure est de considérer comme capteurs, des interrupteurs et comme actionneurs, des leds et l'on retrouve toutes les manipulations de TP que vous avez pu rencontrer à l'école ou à l'université en électronique numérique et en informatique industrielle...

Sur ce schéma théorique se greffe un paramètre important : le rôle de l'environnement extérieur. Contrairement au PC ronronnant bien au chaud dans un bureau, un système embarqué doit faire face à des environnements plus hostiles. Il doit faire face à un ensemble de paramètres agressifs :

- Variations de la température.
- Vibrations, chocs.
- Variations des alimentations.

- Interférences RF.
- Corrosion.
- Eau, feu, radiations.
- ...

L'environnement dans lequel opère le système embarqué n'est pas contrôlé ou contrôlable. Cela suppose donc de prendre en compte ce paramètre lors de sa conception. On doit par exemple prendre en compte les évolutions des caractéristiques électriques des composants en fonction de la température, des radiations...Pense-t-on à tout cela lorsque l'on conçoit une carte mère de PC ?

Enfin pour terminer cette partie, les systèmes embarqués sont aujourd'hui fortement communicants. Cela est possible grâce aux puissances de calcul offertes par les processeurs pour l'embarqué (32 bits en particulier) et grâce aussi à l'explosion de l'usage la connectivité Internet ou connectivité IP.

La connectivité IP permet fondamentalement de contrôler à distance un système embarqué par Internet. Ce n'est en fait que l'aboutissement du contrôle à distance d'un système électronique par des liaisons de tout type : liaisons RS.232, RS.485, bus de terrain...

Cela permet l'emploi des technologies modernes du web pour ce contrôle à distance par l'utilisateur : il suffit d'embarquer un serveur web dans son équipement électronique pour pouvoir le contrôler ensuite à distance, de n'importe où, à l'aide d'un simple navigateur. Il n'y a plus d'IHM spécifique à concevoir pour cela, ce rôle étant rempli par le navigateur web.

Cela est une réalité : les chauffagistes proposent maintenant des chaudières pouvant être pilotées par le web !

Il faut aussi noter la montée en puissance des communications sans fil dans l'embarqué au détriment des communications filaires pour limiter le câblage et faciliter la mise en place du système embarqué. Le Wifi et toutes les normes de réseaux sans fil IEEE 802.15 comme Zigbee ont le vent en poupe dans l'embarqué et surtout en domotique (réseaux de capteurs sans fil par exemple).

Mais ne nous méprenons pas sur ces facilités et commodités, cela a bien sûr un revers : la sécurité du système embarqué puisque connecté à Internet.

La sécurité des systèmes embarqués est donc cruciale aujourd'hui et doit être prise en compte dès leur conception sous peine de voir apparaître une armée de crackers prompts à venir planter votre belle chaudière *high tech* !

Les contraintes de temps et les systèmes embarqués

On entend souvent parler de Temps Réel dès que l'on parle de système embarqué.

En fait, un système embarqué doit généralement respecter des contraintes temporelles fortes (*Hard Real Time*) et l'on y trouve enfoui un système d'exploitation ou un noyau Temps Réel (*Real Time Operating System*, RTOS).

Le Temps Réel est un concept un peu vague et chacun a sa propre idée sur la question.

On pourrait le définir comme : *Un système est dit Temps Réel lorsque l'information après acquisition et traitement reste encore pertinente.*

Plus précisément, cela veut dire que dans le cas d'une information arrivant de façon périodique (sous forme d'une interruption périodique du système), les temps d'acquisition et de traitement doivent rester inférieurs à la période de rafraîchissement de cette information. Un temps maximum d'exécution est garanti (pire cas) et non un temps moyen.

Pour cela, il faut que le noyau ou le système Temps Réel :

- Soit *déterministe* : les mêmes causes produisent les mêmes effets avec les mêmes temps d'exécution.
- Soit *préemptif* : la tâche de plus forte priorité prête à être exécutée doit toujours avoir accès au processeur.

Ce sont là des conditions nécessaires mais malheureusement pas suffisantes pour affirmer qu'un système embarqué est Temps Réel par définition.

Une idée reçue est de mélanger Temps Réel et puissance de calcul du système embarqué. On entend souvent : *Etre temps Réel, c'est avoir beaucoup de puissance : des MIPS, des MFLOPS.*

Ce n'est pas toujours vrai. En fait, être Temps Réel dans l'exemple donné précédemment, c'est être capable d'acquiescer l'interruption périodique (moyennant un temps de latence de traitement d'interruption imposé par le matériel), traiter l'information et le signaler au niveau utilisateur (réveil d'une tâche, libération d'un sémaphore...) dans un temps inférieur au temps entre deux interruptions périodiques consécutives.

On est donc lié à la contrainte durée entre deux interruptions. C'est donc bien le process extérieur à contrôler qui impose ses contraintes temporelles au système embarqué et non le contraire.

Si cette durée est de l'ordre de la seconde (pour le contrôle d'une réaction chimique par exemple), il ne sert à rien d'avoir un système à base de processeur 32 bits performant. Un simple processeur 8 bits voire même un processeur 4 bits fera amplement l'affaire ; ce qui permettra de minimiser les coûts sur des forts volumes de production.

Si ce temps est maintenant de quelques dizaines de microsecondes (pour le traitement des données issues de l'observation d'une réaction nucléaire par exemple), il est alors nécessaire de choisir un processeur nettement plus performant comme un processeur 32 bits (processeurs ARM, ColdFire...). Dans le pire des cas, le traitement en Temps Réel sera réalisé en logique câblé tout simplement.

L'exemple donné est malheureusement idyllique (quoique fréquent dans le domaine des télécommunications et réseaux) puisque notre monde interagit plutôt avec un système embarqué de façon apériodique.

Il convient donc avant de concevoir le système embarqué de connaître la durée minimale entre 2 interruptions ; ce qui est assez difficile à estimer voire même impossible.

C'est pour cela que l'on a tendance à concevoir dans ce cas des systèmes performants et souvent surdimensionnés pour respecter des contraintes Temps Réel mal cernées a priori. Ceci induit en cas de surdimensionnement un surcoût non négligeable...

L'art de bien concevoir un système embarqué

C'est bien là le point le plus excitant et qui est l'essence même de ce Hors Série.

Du point de vue technique, la conception d'un système embarqué demande à son concepteur d'être pluridisciplinaire : électronique, informatique, réseaux, sécurité n'ont pas de secrets pour lui.

Mais le concepteur se doit aussi d'être un bon gestionnaire car concevoir un système embarqué revient finalement à un exercice d'optimisation : *minimiser les coûts de production pour des fonctionnalités optimales*.

Le système embarqué se doit d'être :

- Robuste.
- Simple. La simplicité est gage de robustesse.
- Fiable.
- Fonctionnel. Le système doit toujours fonctionner correctement.
- Sûr surtout si la sécurité des personnes est en jeu.
- Tolérant aux fautes.

D'autres contraintes sont aussi à prendre en compte :

- L'encombrement.
- Le poids.
- Le packaging : difficulté de faire cohabiter dans un faible volume, électronique analogique, électronique numérique et RF sans interférences.
- L'environnement extérieur.
- La consommation électrique. Le système embarqué nomade doit être faible consommation car il est alimenté par des batteries. Une consommation excessive augmente le prix de revient du système embarqué car il faut alors des batteries de plus forte capacité.
- Le coût. Beaucoup de systèmes embarqués sont fabriqués en grande série et doivent avoir des prix de revient extrêmement faibles.
- Le temps de développement. Dans un marché concurrentiel et de niches, il convient d'avoir un système opérationnel le plus rapidement possible pour être le premier sur le marché.

Devant toutes ces contraintes, le concepteur adopte des règles de bon sens :

- Faire simple.
- Utiliser ce que l'on a déjà fait ou fait par d'autres. On appellera cela pudiquement du *design reuse*.
- Ne pas se jeter sur les technologies dernier cri. Quelle est leur pérennité dans le temps ?
- Ne pas se jeter sur le dernier composant sorti surtout s'il est grand public. Quelle est sa pérennité dans le temps surtout s'il l'on travaille pour la défense où l'on demande une maintenance sur 30 ans !
- Utiliser des technologies éprouvées qui ont fait leur preuve. Ces technologies peuvent d'ailleurs avoir plusieurs générations de retard par rapport à leurs homologues grand public.

Pour le grand public, le concepteur de systèmes embarqués peut sembler faire de l'inertie face aux nouvelles technologies mais il faut le comprendre : c'est pour le bien du système qu'il conçoit surtout si la sécurité des personnes est en jeu...

Cela explique en partie le décollage difficile des logiciels libres et de Linux pour l'embarqué. Mais ceci est oublié, la déferlante logiciels libres balaie une à une toutes les réticences.

Les logiciels libres et les systèmes embarqués

Les logiciels libres et en particulier GNU/Linux sont de plus en plus employés dans l'embarqué depuis qu'ils ont commencé à faire leur preuve il y a 6 ans.

Regardons Linux. Pourquoi retrouve-t-on Linux dans l'embarqué ? Tout d'abord pour ses qualités qu'on lui reconnaît maintenant dans l'environnement grand public :

- C'est un logiciel libre disponible gratuitement au niveau source.
- Il est stable et efficace.
- Il n'y a pas de royalties à reverser sur chaque produit le mettant en oeuvre. Cette mauvaise habitude, propre à l'embarqué disparaît et tant mieux.
- C'est un système d'exploitation ouvert.
- Différentes distributions sont disponibles pour coller au mieux à un type d'application.
- Il existe une aide rapide en cas de problèmes par la communauté Internet des développeurs Linux.
- Il y a un nombre de plus en plus important de logiciels libres disponibles.
- La connectivité IP chère aux systèmes embarqués est en standard.

Linux possède d'autres atouts très importants pour l'embarqué :

- Il existe un portage pour processeurs autres que la famille x86 : PowerPC, ARM, MIPS, 68K, ColdFire...
- La taille du noyau est modeste et compatible avec les tailles de mémoires utilisées dans un système embarqué (800 Ko pour μ Clinux sur processeur ColdFire).
- Différentes distributions spécialisées existent pour coller à un type d'application : routeur IP, PDA, téléphone...
- Le chargement dynamique de modules (drivers) est autorisé, ce qui permet d'optimiser la taille du noyau.
- La migration pour un spécialiste Linux à Linux embarqué est rapide et en douceur, ce qui réduit les temps de formation et les coûts...

On retrouve généralement aussi un certain nombre de suppressions de fonctionnalités dans les adaptations de Linux pour l'embarqué.

Il n'y a pas de gestion de la MMU (*Memory Management Unit*) pour ne pas pénaliser les performances globales du système. C'est le cas de μ Clinux, le noyau Linux adapté aux microcontrôleurs sans MMU.

Les systèmes de fichiers en mémoire RAM (*RAM Disk*) ou en mémoire FLASH (*JFFS2 : Journaling Flash File System 2*) sont supportés.

On a en fait entendu parler pour la première fois officiellement de Linux pour l'embarqué à une

exposition *Linux World* en 1999 où les sociétés Motorola, Force et Ziatech ont présenté un système CompactPCI fonctionnant sous «Linux embarqué».

En 2000 a été créé le consortium Linux embarqué (*Embedded Linux Consortium*) dont le but est de centraliser et de promouvoir les développements de solutions Linux embarqué.

Parallèlement s'est mis en place le portail linuxdevices.com dédié à Linux pour l'embarqué.

Tout cela a contribué à la percée de Linux dans le monde de l'embarqué.

Qui dit systèmes embarqués dit souvent Temps Réel. Linux pour l'embarqué supporte aussi différentes extensions Temps Réel. Mon ami Pierre (Ficheux) vous présentera tout cela en détail dans ce Hors Série.

Embarquer Linux dans son système nécessite néanmoins des prérequis concernant le matériel : le processeur doit être au moins un processeur 32 bits avec MMU (Linux) ou sans MMU (μ CLinux) couplé à quelques Mo de mémoire. Si vous êtes obligé d'utiliser un processeur 8 bits par exemple, il vous faudra vous orienter vers d'autres solutions logicielles...

Le tableau suivant montre l'usage de Linux embarqué sur processeurs 32 bit et plus.

Besoin	Petit	Moyen	Haut de gamme	Embarqué haute disponibilité
Taille RAM	< 4 Mo	2-8 Mo	8-32 Mo	> 100 Mo
Taille ROM/FLASH	< 2 Mo	2-4 Mo	4-16 Mo	Go-To Disque Dur
Processeurs	DragonBall 68k ColdFire ARM	MIPS ColdFire ARM SH PowerPC x86		PowerPC x86
Caractéristiques matérielles	Pas de MMU	System on Chip SoC		
Exemples	PDA, téléphone	Routeur, Décodeur, imprimante		Commutateur téléphonique Serveur haute performance

Figure 3 : Linux et le marché de l'embarqué 32 bits et plus

Enfin, Linux n'est rien sans tous les logiciels libres connexes et en premier lieu le compilateur GNU gcc, hautement configurable pour générer des compilateurs croisés.

Mais, il y a aussi tous les outils dédiés à l'embarqué, à faible empreinte mémoire offrant les mêmes fonctionnalités que leurs homologues pour Linux classique. On peut citer :

- L'outil BusyBox, véritable couteau suisse pour avoir toutes les commandes UNIX usuelles avec

un seul exécutable. Sa mise en oeuvre vous sera présentée dans un article de Pierre.

- μ Clibc : la bibliothèque libc à faible empreinte mémoire.
- ...

Une véritable boîte à outils libres pour l'embarqué est à votre disposition et vous sera présentée dans ce Hors Série par votre humble serviteur.

Conclusion

Nous voilà donc au terme de cette introduction sur les systèmes embarqués. Les points les plus importants vous ont été présentés afin d'aborder avec sérénité et sans à priori les articles suivants.

Quel avenir aux systèmes embarqués ? Un avenir radieux.

Quelles sont les évolutions techniques à venir ? Deux pistes semblent se dessiner :

- Un couplage fort entre matériel et logiciel via le développement conjoint matériel/logiciel ou *codesign* et l'approche système sur silicium SoC (*System on Chip*).
- L'explosion de l'électronique/informatique ambiante (*ubiquitous computing*) bon marché couplée à l'Internet ambiant. Les réseaux de capteurs (sans fil) seront omniprésents notamment en domotique.

A suivre donc...et bonne lecture !

Bibliographie

- Trends in Embedded-Microprocessor Design. M. Schlett. Computer Journal. IEEE Computer Society. Août 1998. http://www.cs.utexas.edu/users/dburger/teaching/cs395t-s99/papers/4_embedded.pdf
- Le dossier sur les microcontrôleurs. Electronique No 160. Juillet 2005
- The two Percent Solution. J. Turley. Embedded Systems Programming. Décembre 2002. <http://www.embedded.com/story/OEG20021217S0039>
- Disappearing Hardware. R. Want and al. Computer Journal. IEEE Computer Society. Mars 2002. http://www.intel-research.net/Publications/Seattle/062120021245_50.pdf