

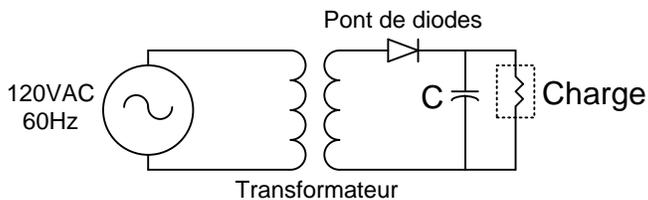
## GIF-3002 Alimentations et Horloge

Ce cours discute de l'alimentation et des horloges des systèmes microprocesseurs et de leurs interfaces. Il présente également les circuits de reset.

# 1 Circuits d'alimentation, convertisseurs AC-DC

## 1.1 Convertisseur AC-DC classique

Presque toutes les sources d'alimentation DC branchées sur les réseaux de distribution AC des utilités publiques (i.e. Hydro-Québec) sont constituées d'un transformateur, d'un pont de diodes et d'un gros condensateur tel qu'illustré ci-dessous. Le transformateur adapte l'amplitude du signal, le pont de diode redresse le signal et le condensateur emmagasine de l'énergie pour la redistribuer sous forme de courant presque continu au circuit qu'il alimente.



Les diverses tensions et formes d'onde illustrées au site

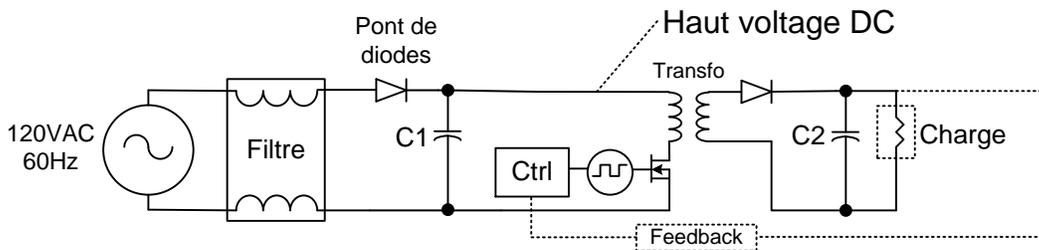
[http://en.wikipedia.org/wiki/AC/DC\\_conversion](http://en.wikipedia.org/wiki/AC/DC_conversion) seront présentées brièvement en classe.

## 1.2 Convertisseur AC-DC haut voltage DC

Le convertisseur AC-DC classique est souvent conçu pour une seule tension d'alimentation AC (110VAC par exemple). La sortie DC varie proportionnellement à l'amplitude de l'entrée. De ce fait, il est habituellement impossible de brancher une source d'alimentation AC-DC américaine en Europe ou en Asie.

*Les pays européens et la plupart des pays asiatiques fonctionnent avec du 220VAC, 50Hz plutôt qu'avec du 110VAC, 60Hz.*

Pour élargir la plage des voltages d'entrée possibles, plusieurs convertisseurs AC-DC modernes redressent le voltage AC d'entrée en voltage DC d'abord, puis ils utilisent un convertisseur DC-DC avec une plage d'entrée très grande pour obtenir la tension voulue :



Le principe de fonctionnement des régulateurs à découpage est présenté ci-dessous.

### **1.3 Paramètres de design**

Les principaux paramètres de design du convertisseur AC-DC présenté ci-dessus sont le courant que peut fournir le convertisseur, la tension de sortie DC et la tension AC maximale d'entrée.

Le courant déterminera la taille du transformateur (la dimension des fils sur le support ferromagnétique), la taille des diodes (plus le courant est élevé, plus la diode dissipera de puissance) et, également la taille du condensateur (la constante de temps de la décharge du condensateur est  $RC$  et  $R$  est inversement proportionnel au courant de décharge...).

La tension de sortie déterminera le ratio des tours du transformateur (pour avoir une tension AC maximum près de la tension DC voulue, en tenant compte de la chute de voltage dans les diodes) et la tension maximale que doit supporter le condensateur.

La tension maximale que doit supporter le condensateur doit être calculée en tenant compte des variations possibles de la source AC. Par exemple, si on considère que le 120VAC d'Hydro-Québec peut varier de 20%, alors la sortie du transformateur peut également varier de 20% et la tension DC apparaissant à la sortie du pont redresseur peut être beaucoup plus élevée que prévue...

La sortie du convertisseur AC-DC présenté est aussi non-régulée : elle varie en fonction de la charge. En effet, plus la charge- $R$  sera grande, plus la tension chutera entre deux alternances de la tension AC, causant une tension DC moyenne plus basse.

### **1.4 Protection, isolation et normes**

La conception d'un convertisseur AC-DC branché sur le réseau de distribution des utilités publiques et conceptuellement facile. Toutefois, plusieurs normes doivent être respectées lors de celle-ci, ces normes pouvant compliquer singulièrement votre tâche.

Par exemple, si votre système microprocesseur a une interface usager accessible par l'utilisateur (des boutons !), votre circuit d'alimentation devra probablement fournir une isolation entre le réseau de distribution et l'interface usager, c'est-à-dire le 0V-GND de votre circuit. Il faudra assurer un risque nul d'électrocution en choisissant le transformateur adéquatement...

L'isolation est aussi parfois nécessaire lorsque vous interconnectez des circuits ayant des voltages de référence (0, GND, VSS) différents. Vous retrouverez souvent des opto-coupleurs sur des interfaces RS232 ou RS485...

Autre exemple, il vous faudra possiblement ajouter des composantes pour protéger votre circuit des événements aléatoires se produisant sur le réseau de distribution. Il faudra ajouter des condensateurs (X1 ou X2, across the line) ou des varistors pour protéger des surtensions ou des éclairs...

Enfin d'autres normes sont à respecter :

- Le bruit que produiront votre alimentation et le système microprocesseur qu'elle alimente doit respecter FCC part 15.
- Vous devrez respecter les normes de sécurités UL ou CSA qui définissent comment doit se comporter votre produit lorsqu'il est soumis à des stresses environnementaux importants...
- Vous devrez respecter des contraintes d'humidité et de température qui sont également souvent décrites par des normes.
- ...

## 2 Circuits d'alimentation, convertisseurs DC-DC

La plupart du temps, le convertisseur AC-DC produit une tension élevée (exemple, 12Vdc) à partir de laquelle sont produites des tensions DC plus basses : il est beaucoup plus facile de partir d'une basse tension DC pour produire une tension DC plus basse encore que de mettre deux convertisseurs AC-DC. Pour produire des tensions DC à partir de tensions DC, deux types de régulateurs sont généralement utilisés : les régulateurs linéaires et les régulateurs par commutation (switching mode power supplies).

### 2.1 Régulateurs linéaires

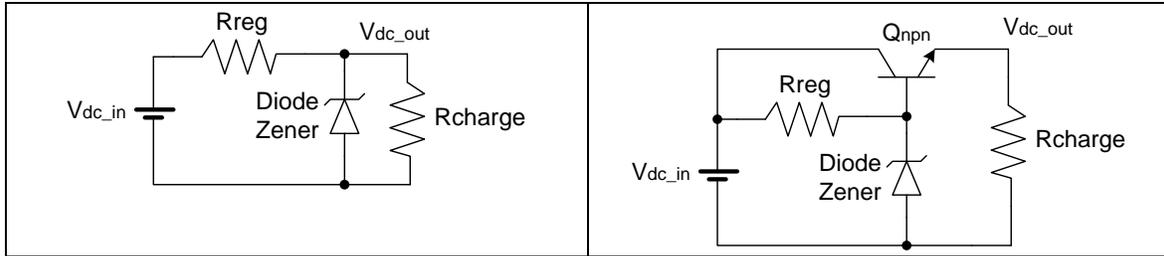
Un régulateur linéaire est un régulateur qui convertit une tension DC d'entrée en tension DC de sortie régulée, c'est-à-dire stable.

L'exemple le plus simple de régulateur linéaire est une diode zener tel qu'illustré ci-dessous. Lorsque la tension d'entrée dépasse la tension d'avalanche de la diode, celle-ci conduit, de telle sorte que la tension, aux bornes de la diode et de la charge de l'alimentation, reste égale à la tension d'avalanche la diode.

Les régulateurs linéaires sont simples : ils sont peu dispendieux. Ils requièrent aussi peu de matériel externe. Cependant, les régulateurs linéaires sont souvent peu efficaces : ils dissipent beaucoup d'énergie sous forme de chaleur. En fait, l'énergie dissipée par le régulateur sera linéairement proportionnelle à la différence de tension entre l'entrée et la sortie et linéairement proportionnelle au courant circulant dans le régulateur. Habituellement, l'efficacité des alimentations linéaires est autour de 25-30% : le régulateur perdra 75-70% de l'énergie entrante sous forme de chaleur.

Un autre désavantage important des régulateurs linéaires (par rapport aux régulateurs SMPS) est le fait que la tension d'entrée doit être toujours plus grande que la tension de sortie voulue. Par exemple, il faudra une alimentation au moins supérieure à 4.5V pour opérer un régulateur linéaire 3.3V. Il existe des régulateurs LDO (Low Drop Out) qui requièrent une différence de tension moins élevée entre l'entrée et la sortie, mais cela demeure un inconvénient de ces régulateurs.

Régulateur linéaire très simple	Régulateur linéaire simple
---------------------------------	----------------------------



## 2.2 Régulateurs à commutation/découpage (SMPS)

Les SMPS sont des alimentations qui accumulent de l'énergie dans une inductance ou un condensateur, puis change le circuit en commutant un interrupteur de telle sorte que l'énergie accumulée dans le condensateur ou l'inductance est redistribuée à un autre circuit, utilisant une tension différente. Ensuite, l'interrupteur ou les interrupteurs sont de nouveau commuté revenant au circuit initial.

Le site web [http://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode\\_power\\_supply](http://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode_power_supply) ou le SMPS de type buck (voir ci-dessous) qui illustre le fonctionnement des SMPS sera partiellement présenté en classe.

Les SMPS avec inductance sont très communs. Un courant DC circule dans une inductance (possiblement un transformateur). Ensuite, un interrupteur (habituellement un MOSFET) est commuté. L'inductance s'oppose à la variation de courant et crée une nouvelle tension DC.

Dans les SMPS avec condensateurs, une charge est accumulée aux bornes du condensateur, puis le condensateur est rebranché autrement, doublant ainsi le voltage ou créant un voltage négatif. Ces alimentations fournissent généralement peu de puissance et elles sont rarement utilisées.

Les régulateurs SMPS ont le désavantage (par rapport aux régulateurs linéaires) d'être plus complexes et plus coûteux. Il faut un circuit intégré qui contrôle un commutateur en générant une onde carrée haute fréquence (généralement entre 10kHz et 1000kHz). Le circuit intégré gère également un signal de feedback (rétroaction) qui arrête (porte ET) l'onde carrée en fonction de la tension de sortie désirée. Enfin, il faut habituellement deux entrées DC pour le circuit de contrôle : l'entrée DC haut-voltage connectée à l'inductance commutée et une entrée bas-voltage pour alimenter le circuit.

En contrepartie, les SMPS sont beaucoup plus efficaces que les régulateurs linéaires (une inductance parfaite ou un condensateur parfait ne consomme pas d'énergie). Habituellement, leur efficacité est autour de 80%.

Un autre désavantage important des SMPS est le bruit. En effet, les régulateurs SMPS sont plus bruyants (en terme de bruit électromagnétique) que les régulateurs linéaires parce qu'ils commutent des tensions DC souvent élevées avec un signal haute-fréquence.

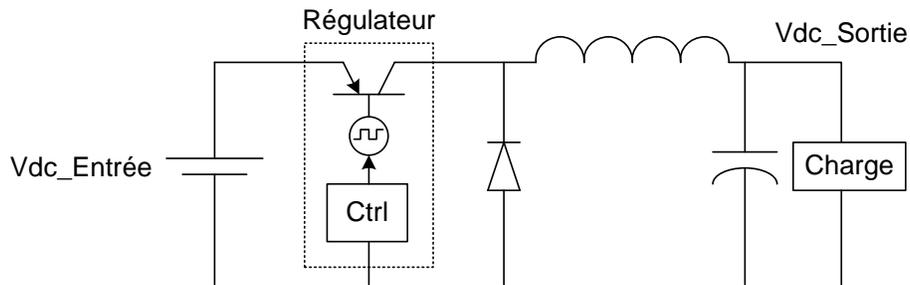
Il faut très souvent filtrer l'alimentation pour respecter les normes de bruit électromagnétique.

*La fréquence de commutation est habituellement entre 40kHz et 1MHz. On choisit toujours une fréquence supérieure à la fréquence audible par l'oreille humaine. Par ailleurs, plus la fréquence de commutation est élevée, plus les inductances du système peuvent être petites (et moins dispendieuses) dans régulateur. En contrepartie, plus la fréquence de commutation est élevée, plus le circuit est plus complexe et bruyant.*

*Habituellement, le duty cycle ou le temps d'opération est ajusté par une boucle de feedback en fonction de la demande en courant.*

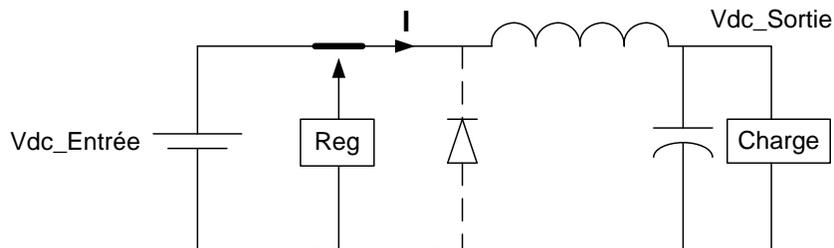
### 2.2.1 Régulateur « Buck »

Le régulateur SMPS de type Buck produit une tension de sortie inférieure à la tension d'entrée. Il a les composantes suivantes :

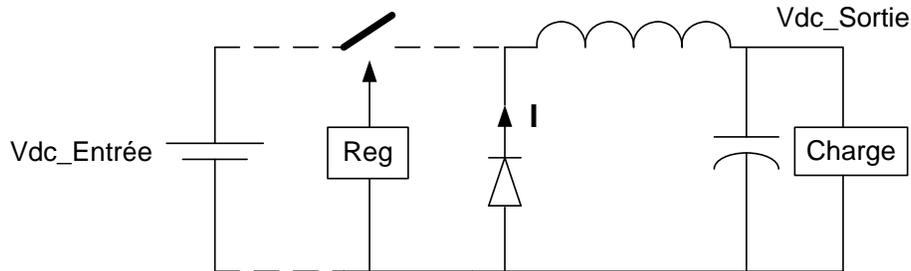


Dans ce circuit, le régulateur, génère une onde carrée ayant une fréquence fixe, mais un « duty cycle » déterminé en fonction du voltage de sortie désirée. Le circuit a deux modes d'opération:

Quand l'onde carrée est à « 0 », la source d'alimentation (Vdc\_Entrée) fournit de l'énergie à la charge. La diode ne conduit pas et le courant dans l'inductance augmente. Le condensateur se charge et Vdc\_sortie :



Quand l'onde carrée est à « 1 », la source d'alimentation (Vdc\_Entrée) est « déconnectée ». L'inductance s'oppose à la variation de courant et fournit de l'énergie à la charge. La diode conduit le courant du système qui diminue:



Lorsque le transistor conduit, la tension aux bornes de l'inductance +  $V_{dc\_Sortie}$  sont égale à  $V_{dc\_Entrée}$ . Lorsque le transistor ne conduit pas, la tension aux bornes de l'inductance est égale et opposée à celle de la sortie, de telle sorte que  $V_{dc\_Sortie}$  est fatalement inférieur à  $V_{dc\_Entrée}$ .

Voir [http://en.wikipedia.org/wiki/Buck\\_convertter](http://en.wikipedia.org/wiki/Buck_convertter) pour plus de détails!

### 2.3 Condensateurs de découplage de l'alimentation

Lorsqu'un circuit intégré est connecté sur une alimentation DC, mettre des condensateurs entre les broches du circuit et VSS est une bonne pratique. Habituellement, on place deux condensateurs entre les broches d'alimentation et la référence de tension (le premier avec une capacité  $C$  élevée -disons 1 $\mu$ F- et un autre avec une capacité plus petite -disons 0.001 $\mu$ F). Ces condensateurs sont des condensateurs de découplage.

Les condensateurs de découplages ont plusieurs fonctions. Principalement, ils absorbent partiellement les variations de courant du circuit intégré et réduisent les contraintes sur les condensateurs de l'alimentation. Les condensateurs de découplage réduisent aussi le bruit local sur l'alimentation du circuit intégré. La combinaison des deux condensateurs (lorsque deux condensateurs sont utilisés !) permet d'éliminer les bruits haute-fréquence captés par les traces du PCB.

## 3 Consommation énergétique du SMI

### 3.1 Consommation du cœur

La consommation de puissance du microprocesseur est proportionnelle à sa fréquence d'opération et proportionnelle au carré de son voltage. Il s'agit de la puissance dynamique consommée par le microprocesseur.

Même lorsque l'horloge du microprocesseur est arrêtée, le microprocesseur consomme tout de même de l'énergie. Un courant de fuite est causé par tous les transistors du circuit intégré. Il s'agit de la puissance statique. L'énergie statique consommée par le microprocesseur est souvent négligeable par rapport à l'énergie dynamique.

### **3.2 Consommation des périphériques et Entrées/Sorties**

Habituellement, un microcontrôleur a une alimentation pour le cœur et une autre alimentation (provenant d'autres broches) pour ses entrées sorties. Cela permet :

- De répartir le courant dans le microcontrôleur
- D'avoir un niveau de tension différent pour le cœur et pour les interfaces
- De mettre une batterie sur certains périphériques seulement (RTC par exemple) ou sur le cœur seulement.
- De rendre très stables les alimentations de certaines entrées ou sorties (ADC, DAC, comparateurs) qui le requièrent.

### **3.3 Modes d'opération du cœur et des E/S pour économie d'énergie**

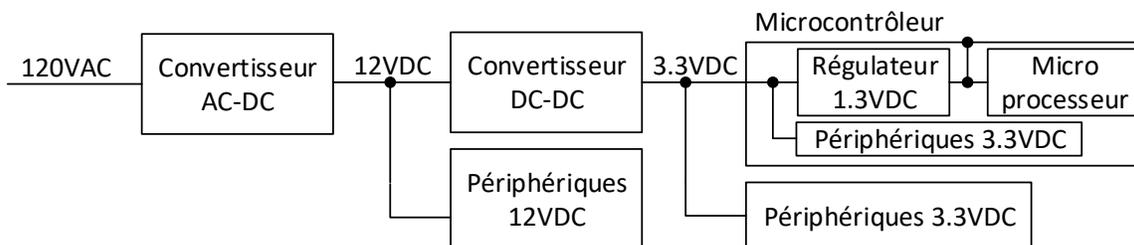
La plupart des microcontrôleurs modernes ont un ou plusieurs modes d'économie d'énergie. Dans ces modes, une partie du microcontrôleur peut être débranchée, la fréquence d'opération du circuit intégré peut être diminuée ou une combinaison de ces deux options peut être employée.

La plupart des microcontrôleurs supportent au moins trois modes d'opération : le mode normal, le mode sommeil léger et le mode sommeil profond. En mode normal, tout roule à plein régime. En mode sommeil léger, le cœur cesse de fonctionner. En mode sommeil profond, le cœur et la plupart des périphériques cessent de fonctionner. Dans les deux modes de sommeil, le système attend après une interruption d'un périphérique pour retourner au mode normal.

*Le LM3S9B92 supporte les modes Run, Sleep et Deep-Sleep. En mode Sleep, le cœur ARM-Cortex M3 et les accès à la mémoire cessent d'avoir une horloge. Par contre, les périphériques choisis (par des registres) demeurent actifs et fonctionnent comme en mode normal (c'est-à-dire avec la même horloge). En mode Deep-Sleep, le cœur ARM-Cortex M3 et les accès à la mémoire cessent également d'avoir une horloge. De plus l'horloge des périphériques encore actifs (sélectionnés par des registres) peut être changée : elle peut devenir l'horloge interne de 30kHz...*

## **4 Alimentation du Système Microprocesseur**

Le circuit d'alimentation d'un système microprocesseur contient habituellement plusieurs alimentations pour différents périphériques et pour le microcontrôleur.



Tous les régulateurs du système, il faut calculer les entrées minimum/maximum et la puissance requise. Par exemple, le convertisseur AC-DC de l'exemple ci-dessus recevra probablement entre 95VAC et 165VAC (la tension de l'utilité publique fournissant l'électricité n'est pas stable, contrairement à la fréquence). Il sortira possiblement entre 13VdDC et 11VDC (en fonction des composants dans le convertisseur, de la température et de la charge) avec 0.2Vrms de bruit à 60kHz. D'un autre côté, le convertisseur 12Vdc devra fournir assez de courant pour les périphériques 12VDC et pour le convertisseur DC-DC. Ce dernier a une certaine efficacité et fournit de la puissance au microcontrôleur (variable en fonction du programme exécuté) et aux périphériques 12VDC...

Enfin, tous les convertisseurs X->DC du système doivent avoir des condensateurs de découplage comme mentionné ci-dessus.

#### 4.1 Broches d'Alimentation du Microcontrôleur

Habituellement un microcontrôleur a plusieurs broches d'alimentation :

Broche(s)	Rôle	Voltage typique
VccIO	Alimentation des périphériques digitaux (I/Os) du microcontrôleur	3.3V
VssIO	Alimentation des périphériques digitaux (I/Os) du microcontrôleur	GND
VccCore	Alimentation du microprocesseur	1.3V
VssCore	Alimentation du microprocesseur	GND
VBat	Alimentation à faible courant pour le RTC et autres circuits qui doivent garder leur contenu hors tension	3V
VssBat	Alimentation à faible courant pour le RTC et autres circuits qui doivent garder leur contenu hors tension	GND
VccAnalog	Alimentation pour les périphériques analogiques (ADC, DAC, comparateurs...)	3.3V filtré
VssAnalog	Alimentation pour les périphériques analogiques (ADC, DAC, comparateurs...)	GND

Plusieurs microcontrôleurs intègrent un régulateur linéaire qui permet de générer VccCore à partir de VccIO. Par exemple, on retrouvera un régulateur linéaire dans le STM32F407 qui convertit une tension de 1.8V à 3.6V en tension de 1.2V (la tension d'opération du microprocesseur). Il faut ajouter des condensateurs pour la stabilité de ce

régulateur interne et on retrouvera parfois des broches nommées VCAP ou équivalent à cet effet.

*Sachant que le régulateur interne d'un microcontrôleur est un régulateur linéaire par construction, y-a-t-il encore un gain à réduire la tension d'alimentation du cœur? Autrement dit, l'économie d'énergie réalisée en diminuant la tension du cœur est-elle perdue en raison de la faible efficacité du régulateur?*

*La réponse à cette question est non : le power supply linéaire a des pertes en chaleur linéaires alors que la puissance consommée par le cœur est proportionnelle au carré de la tension d'alimentation...*

## **4.2 Séquence d'alimentation**

Dans presque tous les SMI, il y a plusieurs alimentations construites en cascade (souvent pour augmenter l'efficacité des régulateurs linéaires). Par exemple, le 12VDC est produit à partir du 120VAC, le 3.3VDC est construit à partir du 12VDC et le 1.3VDC est construit à partir du 3.3VDC. Dans ces cas, les alimentations se suivront lors de la mise sous tension : lorsque le 12VDC montera, le 3.3VDC et le 1.3VDC suivront à partir d'un certain seuil... Lors de la disparition de la source initiale de tension, le 12VDC descendra en premier jusqu'à un certain seuil, il sera ensuite accompagné du 3.3VDC, puis du 1.3VDC de telle sorte que les alimentations deviendront nulle en même temps.

Dans plusieurs systèmes microprocesseur, il faut respecter une séquence d'alimentation pour que le système ne plante pas ou ne s'endommage pas. Habituellement :

- VccIO du microcontrôleur doit être disponible avant que les périphériques branchés sur le microcontrôleur ne produisent de la tension sur les broches du micro.
- Le microcontrôleur doit être en reset, généré à partir de VccIO, tant que VccCore n'est pas stable.

*Dans les datasheets de microcontrôleurs, on retrouve toujours les tensions minimum et maximum qui peuvent être appliquée sur toutes les broches du microcontrôleur. Habituellement les tensions maximales pouvant être appliquée sur des I/Os est VccIO+0.3V ou VssIO-0.3V. Si on applique 3.3V sur une entrée d'un microcontrôleur qui n'est pas alimenté, on risque de détruire celui-ci...*

## **4.3 Mise sous tension du microprocesseur**

Lors de la mise sous tension du microprocesseur, tous les registres des périphériques et du cœur se remettent à leur valeur par défaut. Puis, le microprocesseur commence à exécuter les instructions à une adresse prédéterminée.

*Lors de la mise sous tension de plusieurs microprocesseurs, le signal de reset doit être activé pendant la montée de l'alimentation et pour un certain temps après. Cela permet une initialisation correcte du système et de ses entrées sorties : lorsque l'exécution d'instruction commence, l'alimentation est stable et tous les périphériques sont convenablement initialisés.*

*Dans le même ordre d'idée, il est fréquent de devoir activer le signal de reset lorsque l'alimentation descend. Ainsi, on évite des comportements non désirables du microprocesseur si la tension remonte aléatoirement autour de certains seuils pendant la perte d'alimentation.*

*Des circuits intégrés spéciaux génèrent des pulses de largeur fixe lorsqu'ils détectent une variation de tension. Ces circuits sont souvent connectés à la broche de reset du microcontrôleur ou intégré directement dans celui-ci.*

## **5 Reset**

### **5.1 Causes de reset**

Le reset d'un microcontrôleur peut être causé par plusieurs événements et il peut affecter uniquement certaines parties du microcontrôleur en fonction de l'évènement ayant causé le reset. Les événements suivants causent des resets de microcontrôleurs:

- Le microcontrôleur est mis sous tension (POR = Power On Reset)
- La broche Reset du microcontrôleur est activée
- Un watchdog interne expire
- Le microcontrôleur exécute une instruction de reset
- Un reset est requis par le circuit de debug

Dans presque tous les systèmes actuels, des registres de statut, propres au circuit intégré de reset, indique la cause du reset lors du démarrage du microcontrôleur.

### **5.2 Broche de reset : nReset, boutons et protection**

La broche de reset permet de réinitialiser le microcontrôleur sans couper l'alimentation. Cette broche est parfois reliée à un bouton pour permettre à l'opérateur du système de faire un reset manuel.

Comme le signal de reset est un signal sensible du système, il est souvent protégé contre le bruit et les décharges électrostatiques. Les protections sont habituellement une résistance mise en série avec le bouton et un circuit RC connecté sur la broche de reset.

### **5.3 Chien de garde (Watchdog)**

Un watchdog est un circuit intégré à l'intérieur du microcontrôleur ou à l'extérieur du microcontrôleur qui a pour tâche de faire un reset du microprocesseur s'il ne se passe plus rien (si on exécute une boucle sans fin accidentellement par exemple ou si une décharge électrostatique à fait planter le micro).

Habituellement, les watchdogs internes ne sont pas activés par défaut. Il faut les "nourrir" pour les décoller. Une fois démarré cependant, il faut nourrir le chien de garde à intervalle régulier (et configurable) pour éviter un reset du système. Si vous ne nourrissez pas le chien de garde en écrivant un ou des registres spécifiques, il mord!!!

Pour éviter un mal fonctionnement des watchdogs, il faut souvent une séquence spéciale d'écriture de registres pour nourrir le watchdog. Ainsi, le watchdog ne peut pas être nourri accidentellement...

Activer un watchdog lorsqu'on dévermine une application est une très mauvaise idée. Si vous arrêtez l'exécution du programme (un break point par exemple!), le watchdog cessera d'être nourri et le résultat peut être inattendu. Il est fortement recommandé de désactiver ou de ne pas décoller le watchdog lorsque l'application est en cours de développement !

De manière générale, on ne devrait nourrir le watchdog que si toutes les parties de votre système sont opérationnelles. Par exemple, dans une super boucle, on ne devrait nourrir le watchdog qu'une fois par boucle de main, uniquement si les interruptions sont actives... On pourrait également nourrir le watchdog dans une interruption périodique de timer, uniquement si une nouvelle boucle de main a été exécutée dernièrement...

#### **5.4 Instructions de Reset**

Plusieurs microcontrôleurs ont un circuit intégré qui gère le signal de reset. Ce circuit a des registres de contrôle, l'un d'eux permettant habituellement de générer un reset. Donc, une instruction (souvent un store) permet de faire un reset du microcontrôleur.

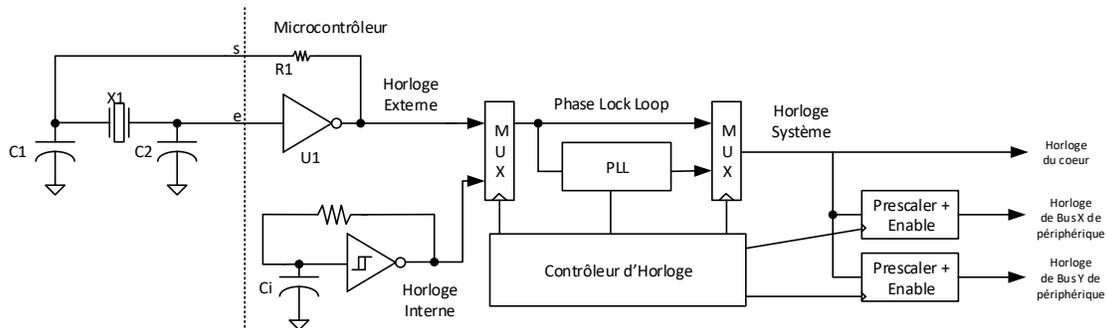
L'instruction de reset est très utile. D'abord, elle peut permettre de réinitialiser le logiciel au besoin, s'il est possible de lancer l'exécution de cette instruction à travers une interface du système. Ensuite, l'instruction de reset permet aussi de faire des resets périodiques des systèmes qui pourraient en avoir besoin ou, simplement, de manière préventive (exemple : je programme un reset à toutes les 24 heures, ainsi, si mon programme plante de manière inattendue, il retombera toujours sur ses pattes...).

*Un watchbear est un reset programmé et périodique d'un système embarqué*

Pour éviter d'éventuels problèmes, le code qui suit une instruction de reset est habituellement une boucle sans fin... Les instructions de reset n'ont pas toujours un effet immédiat.

## 6 Circuit d'Horloge

Un circuit d'horloge typique de microcontrôleur est illustré ci-dessous :



Le circuit d'horloge du microcontrôleur est contrôlé par le contrôleur d'horloge et ses registres. Les registres déterminent si on utilise l'horloge externe avec cristal ou le circuit d'horloge interne, un oscillateur RC. Ils déterminent aussi le multiplicateur de fréquence de la boucle à verrouillage de phase (PLL) ainsi que la source de l'horloge du système. Cette horloge sert pour le cœur et pour les périphériques après avoir été possiblement divisée ou désactivée.

Les sections qui suivent décrivent les diverses composantes de ce circuit d'horloge commun.

Bien entendu, il existe plusieurs variantes au circuit d'horloge illustré ci-dessus. Par exemple, il est possible d'utiliser un oscillateur externe (relié uniquement à la broche "e" du système à la place du cristal. Il y a aussi souvent deux systèmes d'horloge dans le microcontrôleur : un système haute-fréquence (entre 10MHz de 1GHz) pour le cœur et un système basse-fréquence (autour de 32kHz) pour le RTC et pour les modes d'économie d'énergie.

### 6.1 Oscillateur à cristal

Le signal d'horloge externe est souvent produit par un oscillateur Pierce, à basse fréquence. Cette horloge est très précise (l'erreur se mesure en parties par million) et elle est habituellement entre 4MHz et 30MHz.

*L'horloge externe du microcontrôleur est rarement au-dessus de 30MHz pour des raisons physiques et pour respecter les normes d'émission radio : dépasser 30MHz, le bout de fil reliant le cristal au microcontrôleur représente une antenne...*

Les éléments des sites webs suivants seront présentés en classe :

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Pierce\\_oscillator](http://en.wikipedia.org/wiki/Pierce_oscillator)
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Quartz\\_\(%C3%A9lectronique\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Quartz_(%C3%A9lectronique))

## 6.2 Horloge RC

Comme il est assez facile de faire des résistances et des condensateurs, tous les microcontrôleurs modernes intègrent une horloge. Cette horloge fiable sert lors du démarrage du microcontrôleur et permet de ne pas mettre d'horloge externe si désiré. Cependant, cette horloge est terriblement imprécise (entre 1% de précision quand ajustée en usine et 5% de précision sinon), ce qui limite beaucoup son utilisation...

Il y a plusieurs façons d'implémenter l'horloge RC (voir [https://en.wikipedia.org/wiki/RC\\_oscillator](https://en.wikipedia.org/wiki/RC_oscillator)), toutefois seule l'implémentation avec un schmitt-trigger sera présentée en classe (voir <http://electronics-course.com/schmitt-trigger-oscillator>).

## 6.3 Phase Lock Loop

Les principes d'opération des PLLs seront présentés en classe. Pour un rappel, voir :

[http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-locked\\_loop](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-locked_loop)

## 6.4 Autres aspects

Certains éléments de AN-118.pdf seront présentés en classe. Ce document présente divers oscillateurs externes.

Voici quelques notes diverses par rapport aux circuits d'horloge:

- Tous les circuits d'horloge sont constitués d'un nombre impair d'inverseurs ou équivalent avec un circuit créant un délai ou un déphasage entre les inversions du signal,
- Les horloges externes sont beaucoup plus précises que les horloges internes.
- Presque toutes les horloges sont sensibles à la température. Les propriétés électriques du quartz de l'oscillateur de Pierce changent avec la température et la capacité (C) des condensateurs également.
- Les traces reliant le circuit d'horloge au microprocesseur doivent toujours être courtes pour plusieurs raisons. D'abord, les caractéristiques de longs fils nuire à l'opération de l'horloge. Les capacités parasites et l'impédance série peuvent changer la fréquence d'oscillation ou même empêcher l'oscillateur d'osciller. Ensuite, de longues traces sont plus susceptibles de rayonner (voir plus bas).
- S'il y a trop de capacité parasite ou si les condensateurs ou le cristal du filtre d'un oscillateur Pierce sont mal choisies en fonction de la capacité de charge de l'inverseur du microprocesseur, l'horloge externe peut ne pas osciller.
- Les circuits d'horloges haute-fréquences rayonnent : les fils courts entre l'horloge et le microprocesseur peuvent se comporter comme des antennes... S'ils émettent trop de bruit électromagnétique, le système peut ne pas respecter certaines normes (i.e. FCC, part 15). Une PLL est habituellement utilisée pour réduire la fréquence du signal d'entrée...
- Tous les microprocesseurs opèrent entre une fréquence d'horloge minimale et maximale. Cette fréquence est déterminée par l'architecture du microcontrôleur et par les fréquences d'opération de ses diverses composantes. En plus des

fréquences min et max, les éléments suivants devraient être considérés pour choisir la fréquence d'opération du microcontrôleur: la puissance de calcul requise, la puissance électrique disponible, le bruit généré par l'horloge et le coût du circuit d'horloge.

- Chaque périphérique a son horloge. Par défaut, cette horloge est désactivée pour économiser de l'énergie.
- Le contrôleur d'horloge est un circuit logique complexe ayant plusieurs registres dans le microprocesseur. Il est souvent traité comme un périphérique à part entière dans la littérature.