



LES INTERRUPTIONS

[YVES TIECOURA](#), INP-HB YAMOUSSOUKRO

RÉV 2015/12/13

Version provisoire. Nous travaillons sur ce document, mais les remarques sont les bienvenues !

MOTIVATION

Un système à microcontrôleur est généralement pourvu d'entrées et de sorties. Le but premier d'un programme est souvent de réagir correctement aux changements d'état des entrées, en agissant sur la séquence des sorties.

Les enseignes et afficheurs à LED sont plutôt une exception dans ce domaine. Beaucoup d'enseignes et d'afficheurs n'ont aucune entrée et ne font que faire évoluer les sorties selon un ordre prédéfini.

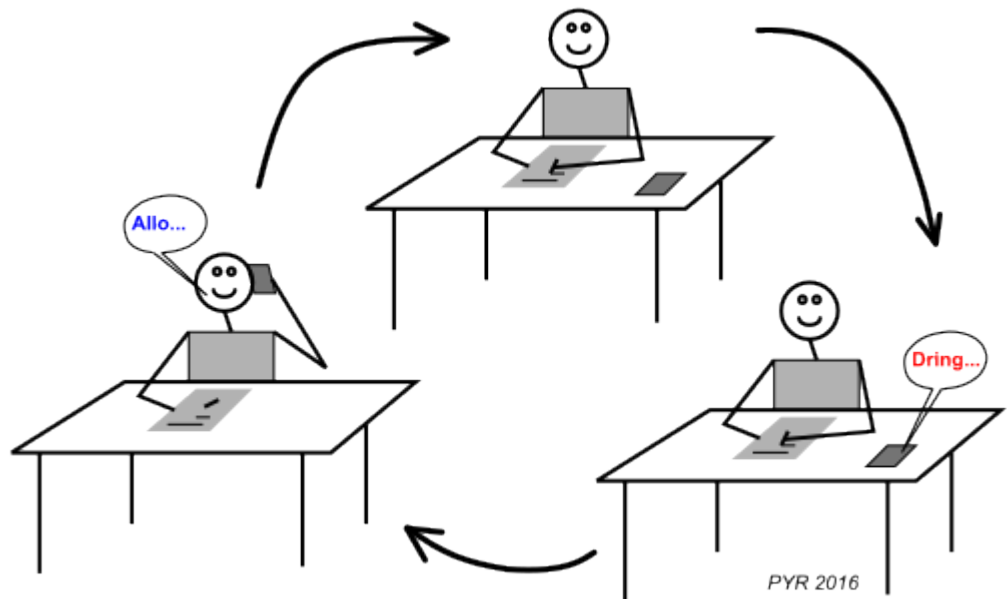
Il existe toutefois des cas où une enseigne ou un afficheur doit réagir à des entrées. Par exemple, une commande peut être utilisée pour allumer et éteindre un afficheur, changer sa luminosité ou le texte qu'il doit afficher. Un autre cas où le système doit réagir à un événement est la gestion du temps dans un système multiplexé : à des instants précis, il faut envoyer de nouvelles valeurs sur les LED.

DÉFINITION

On appelle **interruption** dans un système informatique l'arrêt temporaire d'un programme au profit d'un autre programme, jugé à cet instant plus important. L'interruption correspond au sens qu'on donne

DRAFT

dans nos vies courantes. Prenons un exemple : je suis en train de travailler à mon bureau. Le téléphone sonne. Je vais répondre au téléphone. Après la conversation, je reprends mon travail là où je l'avais laissé.



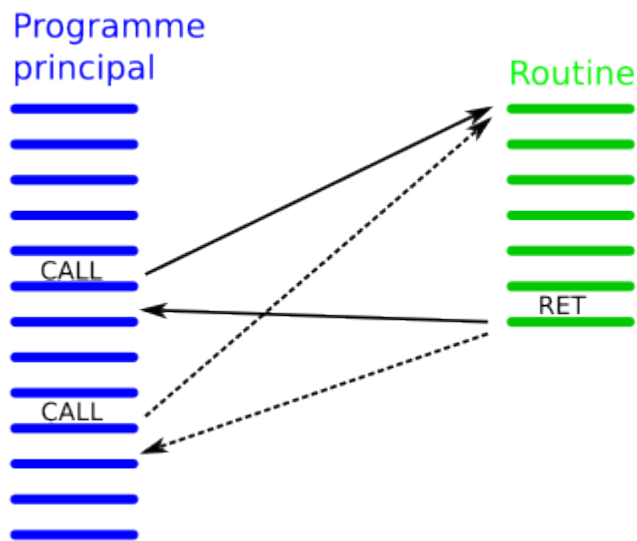
Interruption dans la vie courante

C'est toujours un *événement* qui va produire une interruption. Cet événement a un caractère imprévisible. Un programme ne sait pas quand il va se produire.

IMPLÉMENTATION

Pour utiliser les interruptions, il n'est pas indispensable de comprendre en détail le mécanisme qui les rend possibles. C'est comme les procédures ou les fonctions, que nous avons l'habitude d'utiliser sans forcément connaître les mécanismes matériels qui les rendent possibles.

Toutefois, nous allons ici faire une petite incursion dans le monde de la programmation en assembleur pour mieux comprendre les interruptions. La figure ci-dessous montre un programme, dont les instructions d'interruption sont notées en bleu. Dans le cas où une fraction du programme doit s'exécuter plusieurs fois, on utilise l'habitude de grouper ses instructions, notées ici en vert. On appelle ce morceau de programme une *procédure* ou *sous-routine*. Ce concept correspond aux procédures et aux fonctions dans les langages évolués comme C.

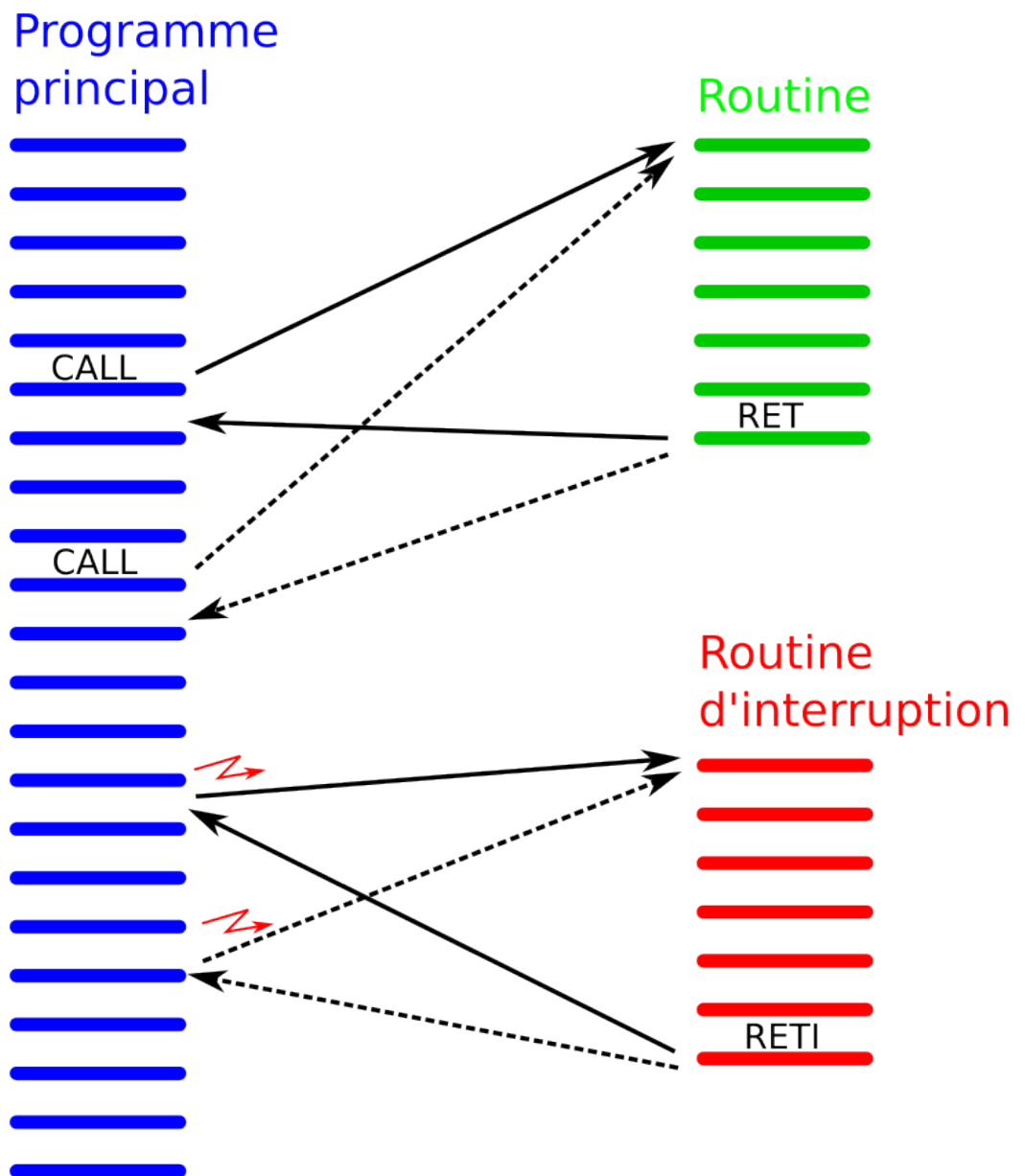


Appel d'une routine

L'appel de la routine se fait par une instruction **Call** dans le programme principal. A la fin de l'exécution de la routine, une instruction **Ret** (return = retour) permet de revenir au programme appelant, juste après l'instruction *Call*. La routine peut être appelée plusieurs fois dans le programme principal.

Notons que l'adresse de retour doit être mémorisée pour que le retour soit possible. C'est une **pile** (stack) en mémoire vive qui est utilisée à cette fin. Nous ne détaillerons pas son mécanisme ici.

Regardons maintenant la figure suivante. Une nouvelle routine, appelée **Routine d'interruption** est représentée en rouge. On voit qu'elle va aussi s'exécuter. Mais son exécution n'est pas la conséquence d'une instruction *Call*.



Principe des interruptions

Rien dans le programme principal ne permet de savoir que cette routine va s'exécuter. C'est un **événement** qui est la cause de son exécution. C'est ce qu'on appelle une interruption.

La routine d'interruption se termine aussi par une instruction de retour, appelée **Reti** (*return from interrupt*). En plus d'effectuer le retour au programme interrompu, elle rétablit le mode de sensibilité aux interruptions qui prévalait avant l'interruption.

NATURE DES ÉVÉNEMENTS

Quels sont ces événements qui vont produire une interruption ? Il en existe principalement deux sortes :

- Les événements **extérieurs** au microcontrôleur. Il s'agit par exemple d'un changement sur une entrée.
- Les événements **intérieurs** au microcontrôleur. Par exemple, beaucoup de microcontrôleurs sont équipés d'un convertisseur analogique-numérique (*ADC = Analog to Digital Converter*). La conversion est déclenchée par un fanion et dure un certain temps. Plutôt que d'attendre la fin de la conversion, le programme principal peut continuer, puis être interrompu au moment de la fin de la conversion.

Dans cette catégorie des interruptions intérieures au microcontrôleur, les plus importantes sont celles des **Timers**. Ce sujet sera abordé dans un chapitre séparé, vu son importance pour la commande de voyants et afficheurs à LED.

DISCRIMINATION DES SOURCES D'INTERRUPTION

Il existe généralement plusieurs sources d'interruptions sur un microcontrôleur. Lorsqu'une interruption est produite, le système doit être capable d'en savoir la source. Si rien n'est prévu au niveau matériel, le contrôleur d'interruption doit consulter les registres pour chaque interruption, pour connaître celle qui a été activée.

Les **vecteurs d'interruption** (*interrupt vectors*) permettent d'être plus efficace : une adresse mémoire est réservée pour le début de la routine de chaque interruption.

Souvent ces deux mécanismes vont être utilisés successivement, comme nous le verrons plus bas lors de l'étude d'une interruption produite par une entrée sur un MSP430.

Voici la table résumée des vecteurs d'interruption pour un MSP430G, y compris l'adresse pour le Reset.

- 0xFFFFE : Reset
- 0xFFFFC : NMI
- 0xFFFFA : Timer1 CCR0
- 0xFFFF8 : Timer1 CCR1, CCR2, TAIFG
- 0xFFFF6 : Comparator_A
- 0xFFFF4 : Watchdog Timer
- 0xFFFF2 : Timer0 CCR0
- 0xFFFF0 : Timer0 CCR1, CCR2, TAIFG
- 0xFFEE : USCI status
- 0xFFEC : USCI receive/transmit
- 0xFFEA : ADC10

- 0xFFE8 : -
- 0xFFE6 : Port P2
- 0xFFE4 : Port P1

Les adresses se trouvent en mémoire flash, ce sont les dernières adresses de l'espace d'adressage de

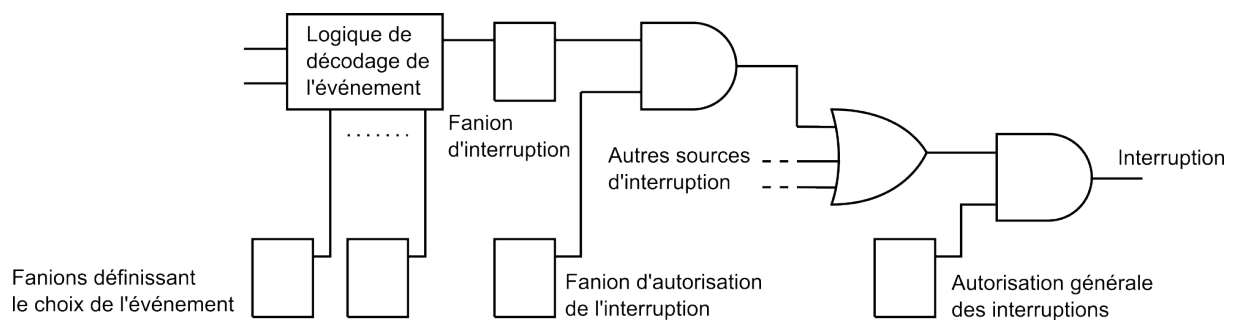
Plusieurs sources d'interruptions nécessitent la scrutation pour déterminer la cause exacte de l'intérêt. C'est le cas par exemple des interruptions sur les ports : chaque bit peut produire une interruption. aussi le cas d'une des interruptions des Timers : les registre de comparaison 1 et 2, ainsi que l'interruption générale du Timer sont regroupés sur un vecteur unique.

MISE EN ŒUVRE D'UNE INTERRUPTION

Plusieurs étapes sont nécessaire pour mettre en œuvre une routine d'interruption :

- 1- Enclencher l'interruption qui nous intéresse. Par exemple une interruption sur une entrée.
- 2- Préciser comment cette interruption doit fonctionner. Par exemple dire sur quel flanc l'interruption doit se produire.
- 3- Enclencher globalement les interruptions. Les microprocesseurs disposent d'un fanion général qui autorise les interruptions. Il est souvent utilisé pour pouvoir éviter les interruptions dans certaines parties critiques au programme, qui ne doivent pas être interrompues.

Le schéma logique ci-dessous montre la logique qui permet de générer les interruptions et les fanions faut ajuster.



Logique de génération des interruptions

On y trouve :

- la logique qui permet de saisir un événement
- les fanions qui règlent la manière dont l'événement est décodé
- le fanion qui enclenche cette interruption particulière

- la porte ET associée à ce fanion pour produire cette interruption
- la porte OU qui permet à toutes les interruptions d’être prises en compte
- le fanion général d’autorisation des interruptions
- la porte ET qui produit finalement les interruptions.

SYNTAXE DES ROUTINES D’INTERRUPTIONS

Le langage C ne définit pas la syntaxe des routines d’interruptions. Plusieurs notations sont utilisées dans différents compilateurs. Nous présenterons ici une des syntaxes supportées par les compilateurs GCC.

```
#pragma vector=NUMERO_DU_VECTEUR
__interrupt void Nom_de_la_routine (void) {
    ...
}
```

La première ligne indique au compilateur à quel vecteur d’interruption la routine sera associée. La deuxième ligne est une déclaration de procédure presque habituelle, avec un nom et aucun paramètres (void). L’indication `__interrupt` permet au compilateur d’utiliser les instructions correspondantes à une routine d’interruption, en particulier le *Reti* final.

INTERRUPTION PRODUITE PAR UNE ENTRÉE

Sur les microcontrôleurs MSP430, plusieurs registres permettent de définir la manière dont une entrée-sortie est utilisée. Ils sont associés à un Port, composé de 8 broches. Sur le MSP430G2553 Launchpad, deux ports sont disponibles : P1 et P2. On connaît déjà les registres suivants :

- **P1DIR** : détermine le rôle de la broche (entrée ou sortie)
- **P1OUT** : donne la valeur pour les broches de sortie
- **P1IN** : permet de lire la valeur des entrées
- **P1REN** : permet d’enclencher une résistance de tirage (pull-up ou pull-down, selon l’état de bit de P1OUT correspondant)

Pour mettre en œuvre les interruptions sur des broches du port P1, trois registres supplémentaires sont disponibles :

- **P1IE** : (*Interrupt Enable*) permet l’enclenchement de l’interruption pour chaque bit. L’usage habituel est d’écrire dans ce registre pour choisir quels bits vont causer une interruption.
- **P1IES** : (*Interrupt Edge Select*) permet de choisir pour chaque bit le flanc qui va produire l’interruption. Lorsque le bit est à 0, l’interruption va se produire lors d’une transition de 0 vers 1 (*low-to-high transition*). L’usage habituel est d’écrire dans ce registre pour choisir quel flanc va causer une interruption, pour chaque bit.

- **P1IFG** : (*Interrupt FlaG*) les **fanions d'interruption**. Lorsque qu'une transition telle qu'elle est spécifiée dans un bit de P1E, le bit correspondant s'active dans P1IFG. C'est son activation qui produit l'interruption elle-même.

Voici un programme qui met en œuvre une interruption sur l'entrée P1.3 (le poussoir du Launchpad change d'état P1.6 (la LED verte) à chaque flanc descendant.

```

1  int main() {
2      WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD; // Stop watchdog timer
3      P1DIR |= (1<<6); // Led verte en sortie
4      P1OUT |= (1<<3); P1REN |= (1<<3); //pull-up sur l'entrée P1.3
5
6      P1IES |= (1<<3); // Mode d'interruption : sur le flanc descendant
7      P1IE |= (1<<3); // Interruption P1 activée sur le bit 3
8      P1IFG &=~(1<<3); // Fanion d'interruption remis à zéro
9      __enable_interrupt(); // General Interrupt Enable
10
11     while(1) { // il n'y a rien à faire dans la boucle principale !
12     }
13 }
14
15 // Routine d'interruption associée au Port P1
16 // Syntaxe spécifique pour les interruptions :
17 #pragma vector=PORT1_VECTOR
18 __interrupt void Port1_ISR(void) {
19     P1IFG &= ~(1<<3); // Fanion d'interruption correspondant au bit 3 remis à zéro
20     P1OUT ^= (1<<6); // inverse P1.6 (LED verte)
21 }

```

La première remarque, c'est que la boucle principale `while(1)...` ne fait rien ! En plus des initialisations classiques des entrées et des sorties, trois instructions ont été ajoutées, correspondant aux étapes en œuvre d'une interruption :

- L'activation d'un bit dans P1IES sélectionne le flanc descendant
- L'activation d'un bit dans P1IE autorise l'interruption sur l'entrée P1.3
- L'appel de la procédure `__enable_interrupt()` autorise globalement les interruptions sélectionnées

La mise à 0 du bit 3 dans le registre des fanions d'interruption P1IFG évite qu'un flanc sur l'entrée P1.3 avant s'être produit avant l'autorisation des interruptions ne cause une interruption.

La routine d'interruption a été placée à la suite du programme principal, alors que nous avons l'habitude de placer les procédures avant le programme principal. Cette procédure n'est en effet jamais appelée directement.

SCRUTATION DU BIT CONCERNÉ

Dans notre exemple, seul le bit 3 est concerné par les interruptions. Dans la routine d'interruption, il n'y a donc pas besoin de regarder quel bit a produit l'interruption et c'est systématiquement le fanion qui est remis à 0.

Lorsque l'interruption peut provenir de plusieurs entrées, il est alors nécessaire de scruter le registre pour connaître le bit qui a causé l'interruption, comme le montre cet exemple :

```

1  int main() {
2
3      P1IES &=~((1<<3)|(1<<4)); // interruptions aux flancs montants
4      P1IE |= (1<<3)|(1<<4); // Interruption activée sur 2 entrées
5      P1IFG &=~((1<<3)|(1<<4)); // Fanions d'interruption remis à zéro
6      ...
7
8      #pragma vector=PORT1_VECTOR
9      __interrupt void Port1_ISR(void) {
10         // scrutation des causes possible de l'interruption :
11         if (P1IFG & (1<<3)) {... ; P1IFG &= ~(1<<3); }
12         if (P1IFG & (1<<4)) {... ; P1IFG &= ~(1<<4); }
13     }

```

INTERRUPTION DE FIN DE CONVERSION

Voici un autre exemple d'interruption, où l'événement est interne au microcontrôleur. L'interruption est produite lorsque le convertisseur Analogique-Numérique (ADC) termine sa conversion.

```

1  int main() {
2      WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD; // Stop watchdog timer
3      P1DIR |= (1<<6); P1OUT &=~(1<<6); // LED verte en sortie
4      // Activation du convertisseur ADC 10 bits (ADC10) :
5      ADC10CTL0 = ADC10SHT_2 + ADC10ON + ADC10IE; // ADC10ON, interrupt enable
6      ADC10CTL1 = INCH_1; // Canal 1 = entrée A1 = P1.1
7      ADC10AE0 |= (1<<1); // Enclenchement de l'entrée A1
8      __enable_interrupt(); // General Interrupt Enable
9      ADC10CTL0 |= ENC + ADC10SC; // lance une première conversion
10
11     while(1) { // il n'y a rien à faire dans la boucle principale !
12     }
13 }
14
15 // Routine d'interruption associée à la fin de conversion ADC
16 #pragma vector=ADC10_VECTOR
17 __interrupt void ADC10_ISR(void) {
18     uint16_t val = ADC10MEM; // lit le résultat de la conversion

```

```
19 ADC10CTL0 |= ENC + ADC10SC; // lance la conversion suivante
20 if (val > 512) { // Montre sur la LED verte si la valeur dépasse Vcc/2
21     P1OUT |= (1<<6); // LED verte On
22 } else {
23     P1OUT &=~(1<<6); // LED verte Off
24 }
25 }
```