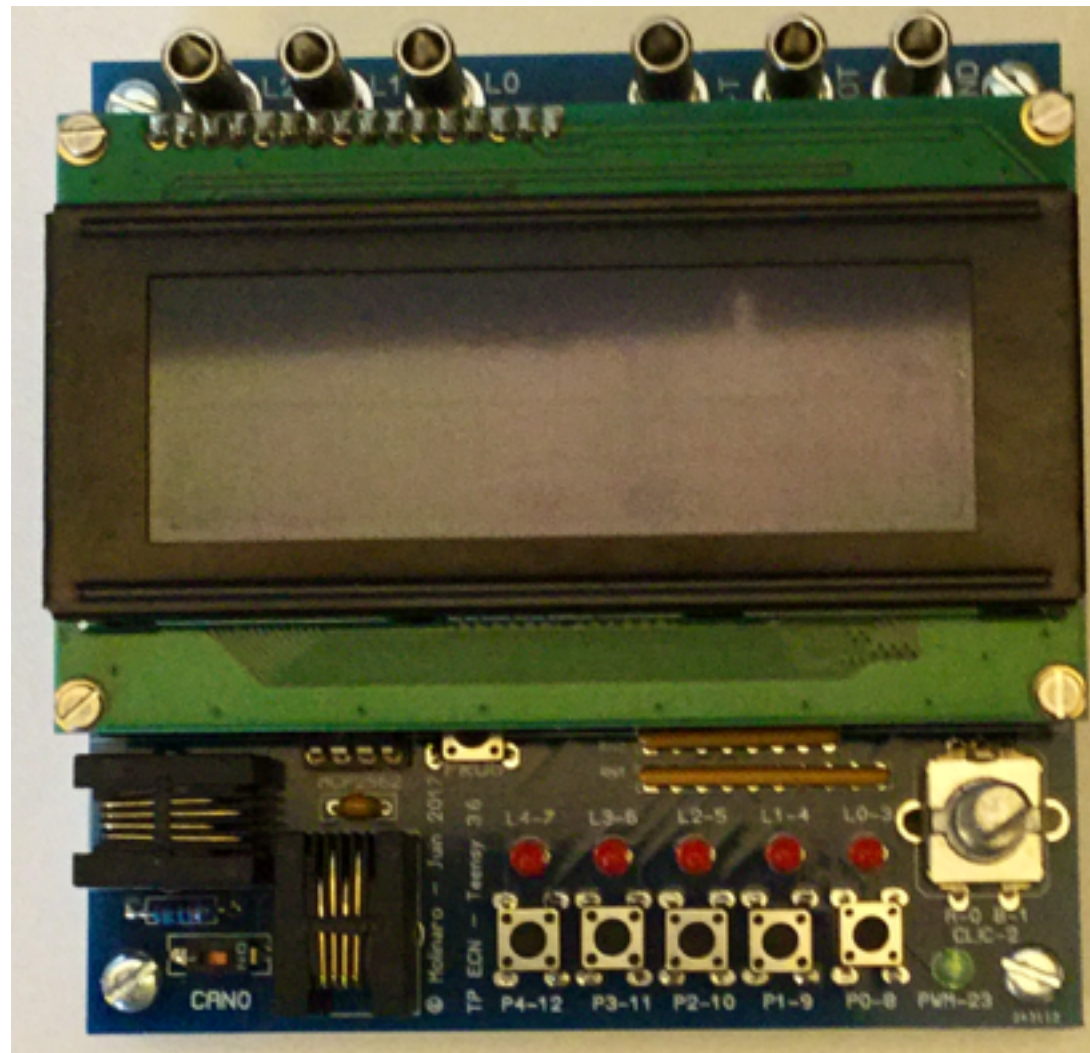


# Temps Réel



*Étape 09-critical-section*

# Description de cette partie

Malheureusement, le qualificatif **volatile**, s'il est nécessaire quand on déclare une variable partagée, n'est pas suffisant dans bien des situations.

## Objectif :

- cette étape va illustrer un comportement pour lequel le qualificatif **volatile** n'est pas suffisant ;
- et va introduire la notion de section critique, et comment les spécifier dans les sources.

# Le programme d'exemple

Remplacer le fichier **setup-loop.cpp** par celui-ci (dans l'archive **09-files.tar.bz2**) :

```
#include "all-headers.h" Les variables partagées sont bien  
déclarées avec le qualificatif volatile.

static volatile uint32_t gCount1 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount2 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount3 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount4 = 0 ;
static volatile bool gPerformCount = true ;

static void rtISR (SECTION_MODE_
                  const uint32_t inUptime) {
    if (gPerformCount) {
        gCount1 += 1 ;
        gCount2 += 1 ;
        gCount3 += 1 ;
        gCount4 += 1 ;
    }
}

MACRO_REAL_TIME_ISR (rtISR) ;

void setup (USER_MODE) {
}
```

```
void loop (USER_MODE) {
    if (gPerformCount) {
        gCount1 += 1 ;
        gCount2 += 1 ;
        gCount3 += 1 ;
        gCount4 += 1 ;
        if (5000 <= millis ()) {
            gPerformCount = false ;
            gotoLineColumn (MODE_ 0, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount1) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 1, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount2) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 2, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount3) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 3, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount4) ;
        }
    }
}
```

# Exécution du programme d'exemple

Exécutez le programme d'exemple, et examinez les valeurs affichées. Essayer plusieurs fois, en changeant la fréquence du processeur (paramètre **CPU-MHZ** dans le fichier **makefile.json**).

Voici un affichage obtenu (fréquence processeur : 180 MHz) :



## Pourquoi les valeurs sont-elles différentes ?

# Le programme d'exemple

*L'incrémentation sous interruption est commentée*

```
#include "all-headers.h"

static volatile uint32_t gCount1 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount2 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount3 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount4 = 0 ;
static volatile bool gPerformCount = true ;

static void rtISR (SECTION_MODE_
                  const uint32_t inUptime) {
    if (gPerformCount) {
//      gCount1 += 1 ;
//      gCount2 += 1 ;
//      gCount3 += 1 ;
//      gCount4 += 1 ;
    }
}

MACRO_REAL_TIME_ISR (rtISR) ;

void setup (USER_MODE) {
}
```

```
void loop (USER_MODE) {
    if (gPerformCount) {
        gCount1 += 1 ;
        gCount2 += 1 ;
        gCount3 += 1 ;
        gCount4 += 1 ;
        if (5000 <= millis ()) {
            gPerformCount = false ;
            gotoLineColumn (MODE_ 0, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount1) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 1, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount2) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 2, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount3) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 3, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount4) ;
        }
    }
}
```



# Le programme d'exemple

*L'incrémentation dans la tâche de fond est commentée*

```
#include "all-headers.h"

static volatile uint32_t gCount1 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount2 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount3 = 0 ;
static volatile uint32_t gCount4 = 0 ;
static volatile bool gPerformCount = true ;

static void rtISR (SECTION_MODE_
                  const uint32_t inUptime) {
    if (gPerformCount) {
        gCount1 += 1 ;
        gCount2 += 1 ;
        gCount3 += 1 ;
        gCount4 += 1 ;
    }
}

MACRO_REAL_TIME_ISR (rtISR) ;

void setup (USER_MODE) {
}
```

```
void loop (USER_MODE) {
    if (gPerformCount) {
        // gCount1 += 1 ;
        // gCount2 += 1 ;
        // gCount3 += 1 ;
        // gCount4 += 1 ;
        if (5000 <= millis ()) {
            gPerformCount = false ;
            gotoLineColumn (MODE_ 0, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount1) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 1, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount2) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 2, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount3) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 3, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount4) ;
        }
    }
}
```





# Pourquoi les valeurs sont-elles différentes ? (1/2)

Le processeur embarqué dans le micro-contrôleur est un processeur Cortex-M4. Or ce processeur ne peut pas effectuer l'incrément d'une variable en mémoire en une seule instruction :

## Code C

```
gCount1 += 1 ;
```

## Code Assembleur ARM engendré

```
ldr r3, ..... @ R3 <- adresse de gCount1
ldr r2, [r3]    @ R2 <- valeur de Count1 (lecture mémoire)
add r2, r2, #1  @ R2 <- R2 + 1
str r2, [r3]    @ Écriture de R2 en mémoire
```

Le code assembleur ARM montre que l'incrément d'une variable est réalisée par plusieurs instructions successives. Une interruption ne peut pas interrompre l'exécution d'une instruction assembleur, mais elle peut interrompre la séquence d'exécution.

ldr	r2, [r3]	←	
add	r2, r2, #1	←	
str	r2, [r3]	←	
		←	

*Positions possibles de la prise en compte de l'interruption.*

# Pourquoi les valeurs sont-elles différentes ? (2/2)

Pour comprendre l'origine du piège, on va abstraire le code assembleur relatif à l'incrémentation d'une variable :

Dans la routine loop

y := gCount1
y ++
gCount1 := y

Dans la routine rtISR

x := gCount1
x ++
gCount1 := x

Comme l'interruption peut être prise en compte à tout instant dans la routine **loop**, on peut avoir par exemple les scénarios suivants :

**Un scénario**

y := gCount1	
y ++	
gCount1 := y	
	x := gCount1
	x ++
	gCount1 := x

La variable est correctement incrémentée de 2 unités.

**Un autre scénario**

y := gCount1	
y ++	
	x := gCount1
	x ++
	gCount1 := x
gCount1 := y	

La variable est incrémentée d'une seule unité.



# Une possibilité de correction : `__atomic_fetch_add`

GCC pour Cortex-M4 possède des *intrinsics* qui engendrent un code assurant que l'incrémentation se réalise de façon atomique.

```
void loop (USER_MODE) {
    if (gPerformCount) {
        __atomic_fetch_add (& gCount1, 1, __ATOMIC_ACQ_REL) ;
        __atomic_fetch_add (& gCount2, 1, __ATOMIC_ACQ_REL) ;
        __atomic_fetch_add (& gCount3, 1, __ATOMIC_ACQ_REL) ;
        __atomic_fetch_add (& gCount4, 1, __ATOMIC_ACQ_REL) ;
        if (5000 <= millis ()) {
            gPerformCount = false ;
            gotoLineColumn (MODE_ 0, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount1) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 1, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount2) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 2, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount3) ;
            gotoLineColumn (MODE_ 3, 0) ;
            printUnsigned (MODE_ gCount4) ;
        }
    }
}
```

Vérifier que les quatre compteurs ont alors toujours la même valeur.

## Liens :

[https://en.wikipedia.org/wiki/Intrinsic\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Intrinsic_function)

[https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/\\_005f\\_005fatomic-Builtins.html](https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/_005f_005fatomic-Builtins.html)

# Seconde possibilité de correction : section critique

Une autre possibilité est rendre ininterrompible la séquence des incrémentations (ou chacune des incrémentations). Pour cela, on va définir des *sections critiques*.

Le système de compilation permet de choisir un schéma de section critique parmi plusieurs possibles. Le choix s'effectue dans le fichier **makefile.json**, avec la clé **SECTION-SCHEME** :

- "SECTION-SCHEME" : "disableInterrupt" : les interruptions sont masquées dans la section critique [**C'EST LE SCHÉMA À UTILISER**] ;
- "SECTION-SCHEME" : "swint" : (*software interrupt*) ce schéma utilise l'interruption n°80 pour exécuter la section critique dans le mode *handler* du processeur ;
- "SECTION-SCHEME" : "bkpt" : (*breakpoint*) ce schéma utilise l'instruction bkpt pour exécuter la section critique dans le mode *handler* du processeur [**NE PAS UTILISER, NE FONCTIONNE PAS**].

# Comment spécifier une section critique

Pour spécifier une section critique, il faut :

- déclarer le prototype de la fonction appelée (en mode **USER**) ;
- implémenter la fonction qui exécute la section critique (en mode **SECTION**) ;
- déclarer la section critique au système de compilation par une annotation particulière ;
- quand on a une ou plusieurs sections critiques, préciser un schéma dans le fichier **makefile.json**, avec la clé **SECTION-SCHEME**.

# Comment spécifier une section critique : en pratique

La fonction qui exécute la section critique en mode SECTION (dans **setup-loop.cpp**) :

```
void section_incrementations (SECTION_MODE) {  
    gCount1 += 1 ;  
    gCount2 += 1 ;  
    gCount3 += 1 ;  
    gCount4 += 1 ;  
}
```

Dans le fichier **setup-loop.h**, on déclare :

- le prototype de la fonction appelée (en mode **USER**) ;
- le prototype de la fonction qui exécute la section critique (en mode **SECTION**) ;
- la section critique au système de compilation par une annotation particulière.

```
//$section fonction.incrementations
```

```
void incrementations (USER_MODE) asm ("fonction.incrementations") ;
```

```
void section_incrementations (SECTION_MODE) asm ("section. fonction.incrementations") ;
```

Dans la fonction **loop** (fichier **setup-loop.cpp**) on appelle la fonction `incrementations` :

```
void loop (USER_MODE) {  
    if (gPerformCount) {  
        incrementations (MODE) ;  
        if (5000 <= millis ()) {  
            .....  
        }  
    }  
}
```

# Code engendré par l'annotation `// $section`

L'annotation `// $section` engendre le code dans **zSOURCES/interrupt-handlers.s**. Voici le code engendré quand le schéma choisi est `disableInterrupt` :

```
fonction.incrementations:
    .fnstart
@--- Save preserved registers
    push    {r6, lr}
@--- Save interrupt enabled state
    mrs     r6, PRIMASK
@--- Disable interrupt
    cpsid   i
@--- Call section, interrupts disabled
    bl      section.fonction.incrementations
@--- Restore interrupt state
    msr     PRIMASK, r6
@--- Restore preserved registers and return
    pop     {r6, pc}
```

En examinant le code ci-dessus, il apparaît que la fonction **fonction.incrementations** peut être appelée interruptions masquées : l'état de masquage est sauvé dans R6, et restitué après l'appel de la section critique.

# Premier travail à faire

Mettre en place la section critique pour incrémenter les variables, et vérifier que les quatre valeurs obtenues sont les mêmes.



# Second travail à faire (1/2)

On va mettre en place un compteur 64 bits permettant d'obtenir une résolution de 1  $\mu$ s. Ce compteur sera conservé dans toutes les étapes ultérieures. Les fichiers à modifier sont **time.h** et **time.cpp**.

Techniquement, ce compteur utilise deux compteurs 32 bits, qui sont chaînés pour obtenir une valeur 64 bits.

L'initialisation est réalisée par le code suivant (à insérer à la fin de startSystick) :

```
//----- Configure and chain PIT0 and PIT1 for 64-bit counting
//--- Power on PIT
SIM_SCGC6 |= SIM_SCGC6_PIT ;
//--- Enable PIT module
PIT_MCR = 0 ;
//--- Disable PIT0 and PIT1
PIT_TCTRL (0) = 0 ;
PIT_TCTRL (1) = 0 ;
//--- PIT0 and PIT1 down-count: initialize them with all 1's
PIT_LDVAL (0) = UINT32_MAX ;
PIT_LDVAL (1) = UINT32_MAX ;
//--- Enable PIT0 and PIT1: start counting, chain PI1 to PIT0, no interrupt
PIT_TCTRL (1) = PIT_TCTRL_CHN | PIT_TCTRL_TEN ;
PIT_TCTRL (0) = PIT_TCTRL_TEN ;
```

# Second travail à faire (2/2)

Ensuite la lecture est effectuée par le code :

```
//--- To obtain the correct value, first read LTMR64H and then LTMR64L
uint64_t result = PIT_LTMR64H ;
result <= 32 ;
result |= PIT_LTMR64L ;
//--- PIT0 and PIT1 actually downcount
result = ~ result ;
//--- Divide by the clock frequency in MHz for getting microsecond count
result /= busMHZ ( ) ;
```

Il n'y a pas de registre 64 bits, la valeur courante est détenue par les deux registres 32 bits PIT\_LTMR64H et PIT\_LTMR64L. La contrainte de lecture est que PIT\_LTMR64H doit être lu en premier, et que cette lecture fige la valeur de PIT\_LTMR64L. Donc, le code ci-dessus doit être exécuté en exclusion mutuelle.

Travail à faire : écrire une fonction micros, callable en mode USER, qui retourne la valeur 64 bits des deux compteurs via une section critique.