Électronique numérique

J.-M Friedt

FEMTO-ST/département temps-fréquence

jmfriedt@femto-st.fr

transparents à `jmfriedt.free.fr`

19 novembre 2019

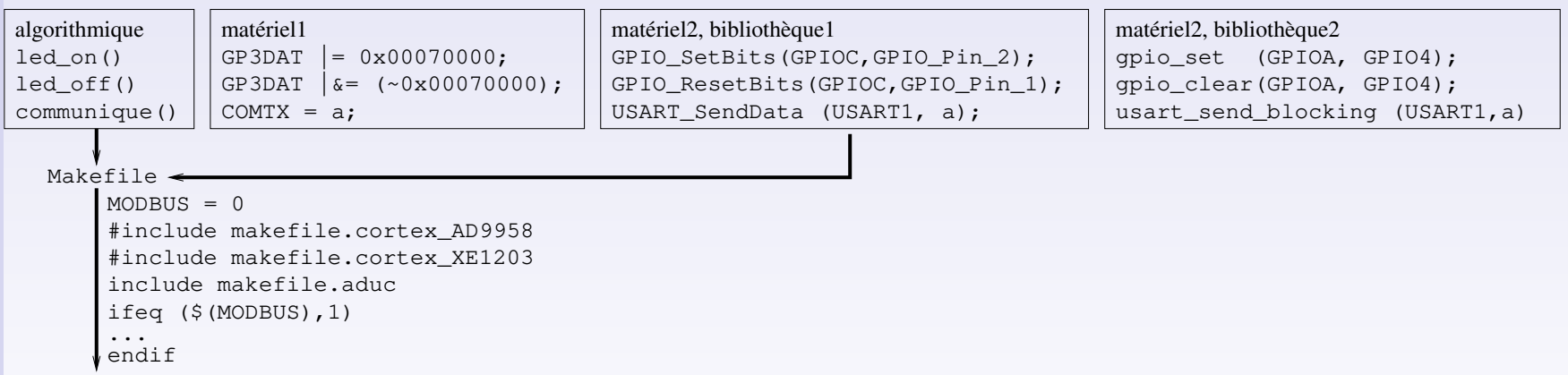
Plan des interventions :

8 cours/TP pour assembler les briques d'un analyseur de réseau numérique :

1. Électronique numérique et conception du circuit
   aspects analogiques, consommation électrique, lecture de datasheet
   Survol des divers périphériques qui seront abordés (RS232, SPI, timer, ADC)
   représentation des données (tailles/encodage), masques, architecture
   Rappels sur Atmega32U4 (Makefile, compilation)
2. Premiers pas sur le STM32, adresses des périphériques
3. Fonctionnement de gcc et optimisations :
   préprocess–compilateur–assembleur–linker, passage C à assembleur, pointeurs
4. Bus de communication série, synchrone/asynchrone
5. bibliothèques
   libopencm3, newlib & stubs, ressources requises par les bibliothèques
6. interruptions et acquisition de données analogiques, fréquence d'échantillonnage
7. méthodes de développement séparant algorithmique et bas niveau
   timer, gestion des horloges du STM32, ADC
   portabilité et test du code sur PC, arithmétique sur systèmes embarqués

Stubs

- Un programme principal contient toute l'"intelligence" du code : algorithmique
- Ce programme fait exclusivement appel à des fonctions génériques indépendantes du matériel : *stubs*
- L'accès de ces fonctions au matériel est implémenté dans des fichiers séparés
- Algorithmique est lié aux appels matériel par le compilation (compilation séparée)
- Possibilité de passer des arguments par `Makefile` : variables et tests conditionnels
- Édition de lien génère un exécutable

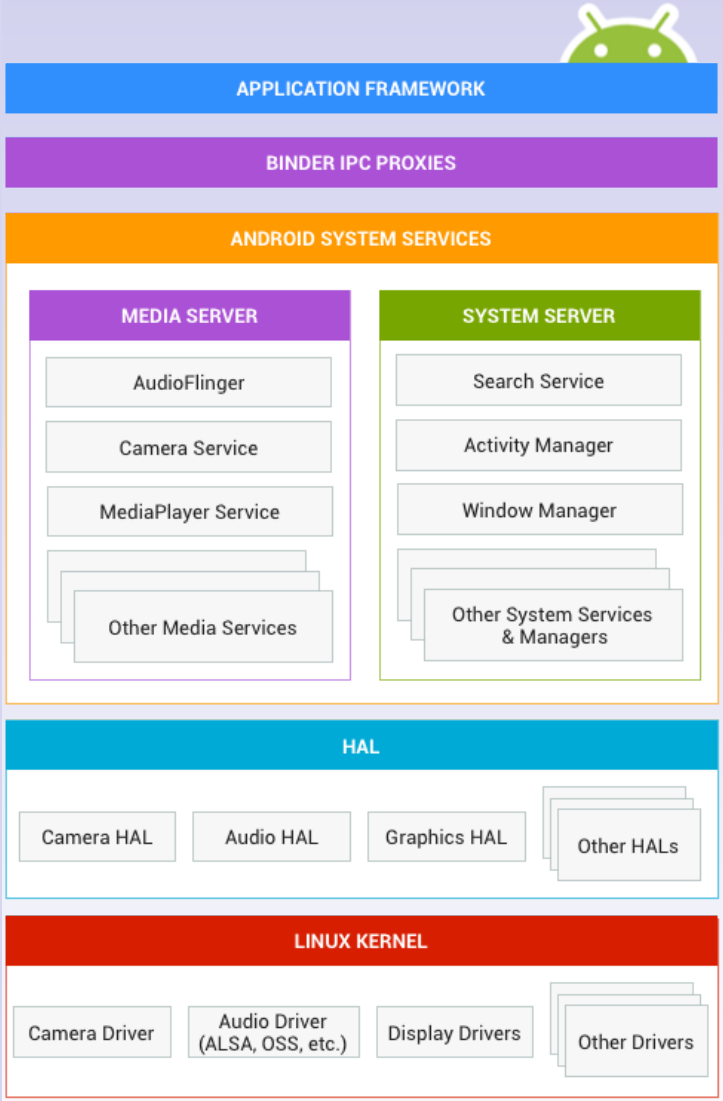


Edition de liens –> exécutable

→ remplacement "aisé" de la plateforme matérielle sans modifier l'algorithme (HAL)

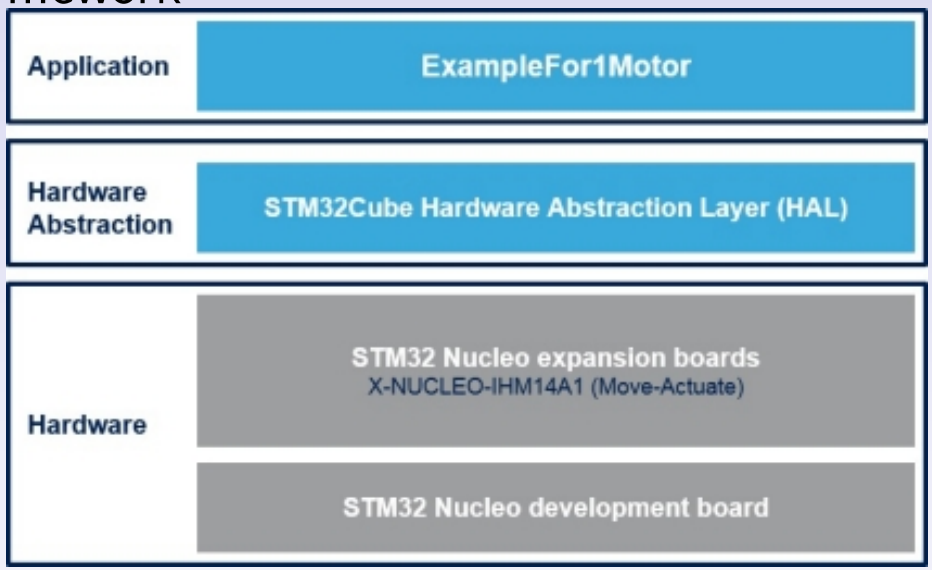
→ "fausses fonctions" sur PC pour émuler les appels : test unitaire

HAL : Hardware Abstraction Layer Android



HAL

ST Microelectronics development framework



https://source.android.com/devices/architecture

https://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-spn14.html

Conception de logiciels

1. Séparer le code lié au matériel (initialisation et accès aux ressources matérielles) de l'algorithmique
2. Compilation séparée : choisir une implémentation du matériel ou une émulation logicielle (gcc supporte une multitude de plateformes)
3. Permet de tester son code sur PC avant de le porter au microcontrôleur (simulation de diverses conditions matérielles) – test automatique, en particulier de cas pathologiques
4. Exploitation d'un simulateur pour connaître l'état interne de la machine qui séquence le code
5. qemu pour grand nombre de plateformes, `simavr` pour Atmega32U**2**

```
unsigned short interroge (unsigned short puissance, unsigned int freq,unsig
{ unsigned int v12;
  FTW0[1] = (freq & 0xFF000000) >> 24;
  FTW0[2] = (freq & 0xFF0000) >> 16;
  FTW0[3] = (freq & 0xFF00) >> 8;
  FTW0[4] = (freq & 0xFF);
[...]
  v12 = readADC12 ();
  readerF2_CLR;                    // coupe reception
  TIM_ITConfig (TIM3, TIM_IT_Update, ENABLE);
  return (v&0x03F);
}
```

Conception de logiciels

1. Séparer le code lié au matériel (initialisation et accès aux ressources matérielles) de l'algorithmique
2. Compilation séparée : choisir une implémentation du matériel ou une émulation logicielle (gcc supporte une multitude de plateformes)
3. Permet de tester son code sur PC avant de le porter au microcontrôleur (simulation de diverses conditions matérielles) – test automatique, en particulier de cas pathologiques
4. Exploitation d'un simulateur pour connaître l'état interne de la machine qui séquence le code
5. qemu pour un grand nombre de plateformes, `simavr` pour Atmega32U**2**

```
unsigned short interroge(unsigned short puissance,unsigned int freq, \
  __attribute__((unused))unsigned int offset,__attribute__((unused))unsigne
{float reponse;
 reponse =exp(-(((float)freq-f01)/df)*(((float)freq-f01)/df))*3100.;
 reponse+=exp(-(((float)freq-f02)/df)*(((float)freq-f02)/df))*3100.;
 reponse+=(float)((rand()-RAND_MAX/2)/bruit); // ajout du bruit;
 if (reponse<0.) reponse=0.;
 if (reponse>4095.) reponse=4095.;
 usleep(60);
 return((unsigned short)reponse);
}
```

Cas des interruptions

Version PC

```
void handle_alarm(int xxx)
{ //  printf("RTC : %d %d %d\n",seconde,→
      ↪minute,heure);
  tim0+=10;
  seconde+=10;
  if (seconde>600){minute++;seconde=0;}
  if (minute>60) {heure++;minute=0;}
  alarm(1);
}

void handle_io(int xxx)
{ // io_happened=1;
  global_tab[global_index] = getchar ();
  if (global_index < (NB_CHARS - 1))
     global_index++;
}

int main() {
  signal(SIGALRM, handle_alarm);

  io_happened=0;
  struct termios buf;
  tcgetattr(0, &buf);
  buf.c_lflag &= ~(ECHO | ICANON);
  buf.c_cc[VMIN]=1;
  buf.c_cc[VTIME]=0;
  tcsetattr(0, TCSAFLUSH, &buf);
  signal(SIGIO, handle_io);
    int savedflags=fcntl(0, F_GETFL, 0);
  fcntl(0, F_SETFL, savedflags | O_ASYNC | →
       ↪O_NONBLOCK );
  fcntl(0, F_SETOWN, getpid());
  alarm(1);  // si on veut simuler le timeout
}
```

Version microcontroleur

```
void tim3_isr(void)  // VERSION LIBOPENCM3
{
 if (TIM_GetITStatus(TIM3,TIM_IT_Update)!=→
       ↪RESET)
  {TIM_ClearITPendingBit(TIM3,TIM_IT_Update);
   tim0++;
   seconde++;          // seconde en 1/10 →
         ↪seconde
   if (seconde > 600)
     {seconde = 0;minute++;}
  if (minute > 60)
     {minute = 0;heure++;}
  if (heure > 24)
     {heure = 0;}
  }
}

void usart1_isr(void)
{
  if( USART_GetITStatus(USART1, USART_IT_RXNE→
        ↪))
    {USART_ClearITPendingBit(USART1,→
          ↪USART_IT_RXNE);
     USART_ClearFlag(USART1,USART_IT_RXNE);
     {
      global_tab[global_index]=→
            ↪USART_ReceiveData(USART1);
      if (global_index<(NB_CHARS-1)) →
            ↪global_index++;
     }
    }
}
```

Profiter des outils d'analyse

`valgrind` pour étudier les fuites de mémoire

```
int main()
{char *c;
 c=(char*)malloc(100);
}
```

est analysé par

`valgrind --leak-check=full ./programme`

pour indiquer que

```
==20235== HEAP SUMMARY:
==20235==     in use at exit: 100 bytes in 1 blocks
==20235==   total heap usage: 1 allocs, 0 frees, 100 bytes allocated
==20235==
==20235== 100 bytes in 1 blocks are definitely lost in loss record 1 of 1
==20235==    at 0x483577F: malloc (vg_replace_malloc.c:309)
==20235==    by 0x109146: main (in ...)
==20235==
==20235== LEAK SUMMARY:
==20235==    definitely lost: 100 bytes in 1 blocks
```

`valgrind` a détecté que le tas n'est pas vide en fin d'exécution

Profiter des outils d'analyse

`valgrind` pour étudier les accès illégaux de mémoire

```
int main()
{char *c;
 c=(char*)malloc(100);
 c[100]=10;
 free(c);
}
```

est analysé par

`valgrind -q ./programme`
pour indiquer que

```
==21801== Invalid write of size 1
==21801==    at 0x109163: main (in ...)
==21801==  Address 0x4a490a4 is 0 bytes after a block of size 100 alloc'd
==21801==    at 0x483577F: malloc (vg_replace_malloc.c:309)
==21801==    by 0x109156: main (in ...)
```

Étrangement, alors que

```
char *c; c=(char*)malloc(100); c[100]=10; free(c);
```

et

```
static char c[100]; c[100]=10;
```

assignent tous deux c sur le tas, seule la première erreur d'allocation est détectée par `valgrind`.

Profiter des outils d'analyse

`valgrind` pour étudier accès à une zone mémoire non-allouée (moins évident à analyser sur la pile : corruption du compteur de programme au retour de la fonction `printf()`)

```
int main()
{int i[3],k;
 for (k=0;k<10;k++) {i[k]=k;printf("%d ",i[k]);}
}
```

qui s'exécute pour donner `Segmentation fault` ...
... est analysé par `valgrind -q ./mon_programme` et donne

```
==22408== Jump to the invalid address stated on the next line
==22408==    at 0x700000006: ???
==22408==    by 0x900000007: ???
==22408==    by 0x48ACBBA: (below main) (libc-start.c:308)
==22408==  Address 0x700000006 is not stack'd, malloc'd or (recently) free'
==22408==
==22408==
==22408== Process terminating with default action of signal 11 (SIGSEGV)
==22408==  Access not within mapped region at address 0x700000006
==22408==    at 0x700000006: ???
==22408==    by 0x900000007: ???
==22408==    by 0x48ACBBA: (below main) (libc-start.c:308)
```

Profiter des outils d'analyse

gprof pour étudier le temps d'exécution de chaque fonction

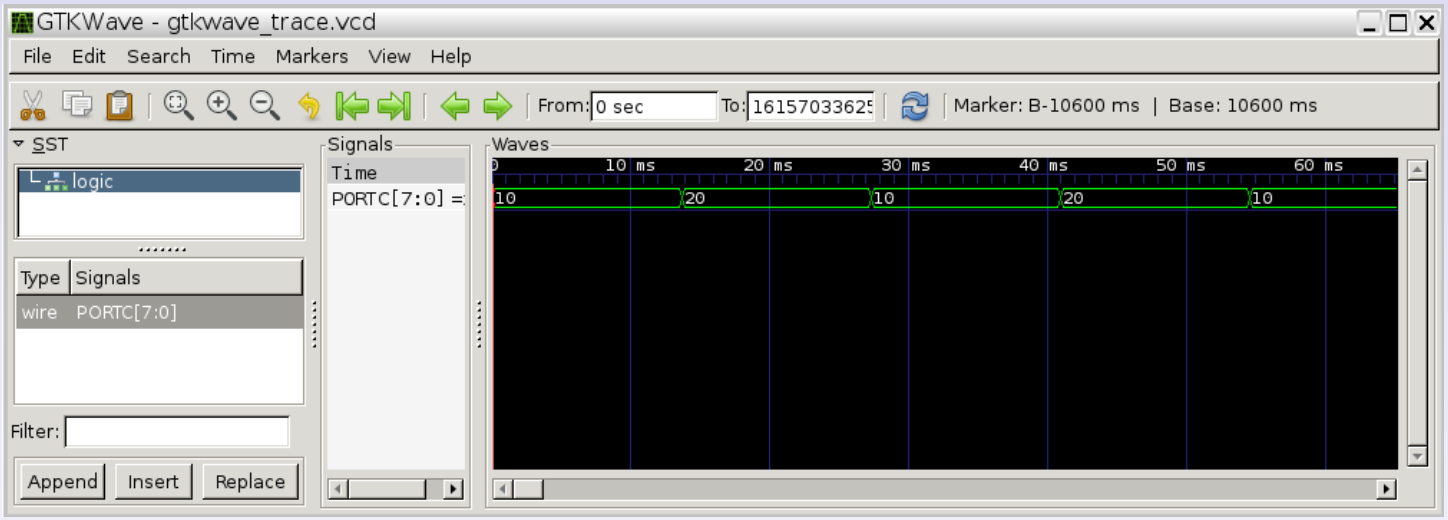
```
void fonction1s()
{volatile int k;for (k=0;k<0x1000000;k++) {};}

void fonction2s()
{volatile int k;for (k=0;k<0x2000000;k++) {};}

void fonction3s()
{volatile int k;for (k=0;k<0x3000000;k++) {};}

int main()
{fonction1s();
 fonction2s();
 fonction3s();
}
```

qui se compile avec l'option -pg pour générer à l'exécution gmon.out ...
... qui s'analyse par gprof -bp ./mon_programme et donne

```
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  ms/call  ms/call  name
 55.56      0.10     0.10        1   100.00   100.00  fonction3s
 33.33      0.16     0.06        1    60.00    60.00  fonction2s
 11.11      0.18     0.02        1    20.00    20.00  fonction1s
```

Simulateur

1. Exploitation d'un simulateur pour connaître l'état interne de la machine qui séquence le code
2. `qemu` pour un grand nombre de plateformes, `simavr` pour Atmega32U**2**



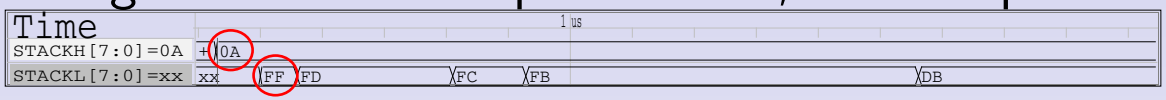
Capture d'écran de `gtkwave` utilisé pour afficher l'évolution du port C.

Préfixer son programme des déclarations de simulations :

```
#include "avr_mcu_section.h"
AVR_MCU(F_CPU, "atmega32");

const struct avr_mmcu_vcd_trace_t _mytrace[]  _MMCU_ = {
                { AVR_MCU_VCD_SYMBOL("PORTB"), .what = (void*)&PORTB, },
        };

int main {DDRB |=1<<PORTB5; while (1){PORTB^=1<<PORTB5; _delay_ms(1000);}}
```

Simulateur

1. Exploitation d'un simulateur pour connaître l'état interne de la machine qui séquence le code
2. qemu pour grand nombre de plateformes, `simavr` pour Atmega32U2



Memory		Mnemonic	ATmega32U4	ATmega16U4
Flash	Size	Flash size	32KB	16KB
	Start Address	- 0x0000		
	End Address	Flash end	0x7FFF(1) 0x3FFF(2)	0x3FFF(1) 0x1FFF(2)
32 Registers	Size	-	32 bytes	32 bytes
	Start Address	-	0x0000	0x0000
	End Address	-	0x001F	0x001F
I/O Registers	Size	-	64 bytes	64 bytes
	Start Address	-	0x0020	0x0020
	End Address	-	0x005F	0x005F
Ext I/O Registers	Size	-	160 bytes	160 bytes
	Start Address	-	0x0060	0x0060
	End Address	-	0x00FF	0x00FF
Internal SRAM	Size	ISRAM size	2,5KB	1.25KB
	Start Address	ISRAM start	0x100	0x100
	End Address	ISRAM end	0x0AFF	0x05FF

Préfixer son programme des déclarations de simulations :

```
#include "avr_mcu_section.h"
AVR_MCU(F_CPU, "atmega32");

const struct avr_mmcu_vcd_trace_t _mytrace[]  _MMCU_ = {
            { AVR_MCU_VCD_SYMBOL("PORTC"), .what = (void*)(0x28), }, // &PORTC
            { AVR_MCU_VCD_SYMBOL("STACKL"), .what = (void*)(0x5D), }, // stack=0x3{DE}+0x20
            { AVR_MCU_VCD_SYMBOL("STACKH"), .what = (void*)(0x5E), }, // stack=0x3{DE}+0x20
        };
```

Émulation des périphériques

Un émulateur simule le comportement du cœur du processeur, mais comment émuler les périphériques [1] ?

Exemple du convertisseur analogique-numérique du STM32 :

```
static void stm32_adc_start_conv(Stm32Adc *s)
{uint64_t curr_time = qemu_clock_get_ns(QEMU_CLOCK_VIRTUAL);
 int channel_number=stm32_ADC_get_channel_number(s,1);
 if (channel_number==16)
    {s->Vdda=rand()%(1200+1) + 2400;          // Vdda belongs to the interval [2400 3600] mv
     s->Vref=rand()%(s->Vdda-2400+1) + 2400; // Vref belongs to the interval [2400 Vdda] mv
     s->ADC_DR= s->Vdda - s->Vref;
    }
 else if (channel_number==17)i
    {s->ADC_DR= (s->Vref=rand()%(s->Vdda-2400+1) + 2400); //Vref [2400 Vdda] mv
    }
 else
    {s->ADC_DR=((int)(1024.*(sin(2*M_PI*qemu_clock_get_ns(QEMU_CLOCK_VIRTUAL)/1e9)+1.))&0xfff→
          ↪);
    }
 s->ADC_SR&=~ADC_SR_EOC;  // indicates ongoing conversion
 s->ADC_CR2&=~ADC_CR2_SWSTART;
 // calls conv_complete when expires
 timer_mod(s->conv_timer,  curr_time + stm32_ADC_get_nbr_cycle_per_sample(s,channel_number));
}
```

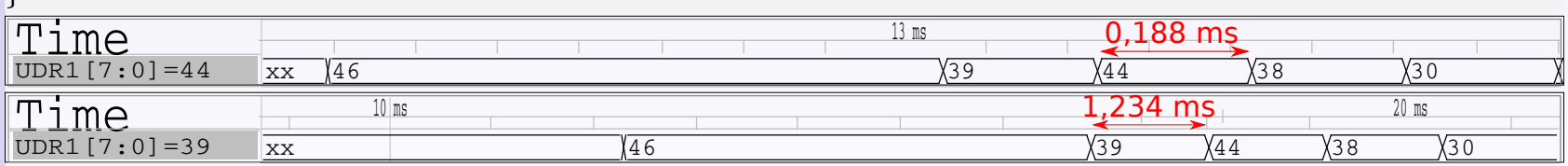
1. https://github.com/beckus/qemu_stm32/blob/stm32/hw/arm/stm32_adc.c#L700

Communication RS232[2] (32U4)

```
#include "avr_mcu_section.h"
AVR_MCU(F_CPU, "atmega32");
AVR_MCU_VCD_FILE("trace_file.vcd", 1000);
const struct avr_mmcu_vcd_trace_t _mytrace[]  _MMCU_ = {
    { AVR_MCU_VCD_SYMBOL("UDR1"), .what = (void*)&UDR1, }, };
```

pour déclarer le registre observé (UDR1), puis

```
#define UART_BAUDRATE (57600)
//#define UART_BAUDRATE (9600)

void init_uart(void)
{unsigned short baud;
 UCSR1A = (1<<UDRE1);                  // importantly U2X1 = 0
 UCSR1B = (1 << RXEN1)|(1 << TXEN1); // enable receiver and transmitter
 UCSR1C = (1<<UCSZ11)|(1<<UCSZ10);    // 8N1              // UCSR1D = 0; // no rtc/cts
 baud  = ((((  F_CPU / ( UART_BAUDRATE * 16UL))) - 1));
 UBRR1H = (unsigned char)(baud>>8);
 UBRR1L = (unsigned char)baud;
}

void uart_transmit (unsigned char data)
{while (!( UCSR1A & (1<<UDRE1)));     // wait while register is free
 UDR1 = data;                         // load data in the register
}

void send_byte(unsigned char c)
{unsigned char tmp;
 tmp=c>>4;      if (tmp<10) uart_transmit(tmp+'0'); else uart_transmit(tmp+'A'-10);
 tmp=(c&0x0f); if (tmp<10) uart_transmit(tmp+'0'); else uart_transmit(tmp+'A'-10);
}
```



2. J.-M Friedt, *Développer sur microcontrôleur sans microcontrôleur : les émulateurs*, GNU/Linux Magazine France HS 103 (Juillet-Aout 2019)

Nouvelle architecture : RISC V

```c
#include <stdio.h>
int main()
{long x=0x12345678;
 char *c=(char*)&x;
 printf("\n%d\n",sizeof(long));
 printf("%hhx %hhx %hhx %hhx\n",c[0],c[1],c[2],c[3]);
}
```

Rappel : `newlib` nécessite le *stub* `write()` pour afficher

```
FEMTO=[...]/riscv-probe/
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32imac -mabi=ilp32 -mcmodel=medany -c h.c
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv32imac -mabi=ilp32 -mcmodel=medany \
  -nostartfiles -nostdlib -nostdinc -static -lgcc \
  -T $(FEMTO)/env/qemu-sifive_e/default.lds \
  $(FEMTO)/build/obj/rv32imac/env/qemu-sifive_e/crt.o \
  $(FEMTO)/build/obj/rv32imac/env/qemu-sifive_e/setup.o h.o \
  $(FEMTO)/build/lib/rv32imac/libfemto.a -o hello32
```

s'exécute dans qemu par

```
$ [...]/riscv-qemu/riscv32-softmmu/qemu-system-riscv32 -M sifive_e \
  -nographic -kernel hello32
4
00000078 00000056 00000034 00000012
```

→ long est codé sur cette architecture 32 bits sur 4 octets

→ 0x78 apparaît en premier, l'octet de poids faible est à l'adresse la plus faible : *little endian*

Nouvelle architecture : RISC V

```c
#include <stdio.h>
int main()
{long x=0x12345678;
 char *c=(char*)&x;
 printf("\n%d\n",sizeof(long));
 printf("%hhx %hhx %hhx %hhx\n",c[0],c[1],c[2],c[3]);
}
```

Rappel : `newlib` nécessite le *stub* `write()` pour afficher

En compilant en 64 bits par (options `-march=` et `-mabi`) :

```
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv64imac -mabi=lp64 -mcmodel=medany -c h.c
riscv64-unknown-elf-gcc -march=rv64imac -mabi=lp64 -mcmodel=medany \
  -nostartfiles -nostdlib -nostdinc -static -lgcc \
  -T $(FEMTO)/env/qemu-sifive_e/default.lds \
  $(FEMTO)/build/obj/rv64imac/env/qemu-sifive_e/crt.o \
  $(FEMTO)/build/obj/rv64imac/env/qemu-sifive_e/setup.o h.o
  $(FEMTO)/build/lib/rv64imac/libfemto.a -o hello64
```

nous obtenons sous la version 64 bits de qemu le résultat

```
$ [...]/riscv-qemu/riscv64-softmmu/qemu-system-riscv64 -M sifive_e \
  -nographic -kernel hello64
8
00000078 00000056 00000034 00000012
```

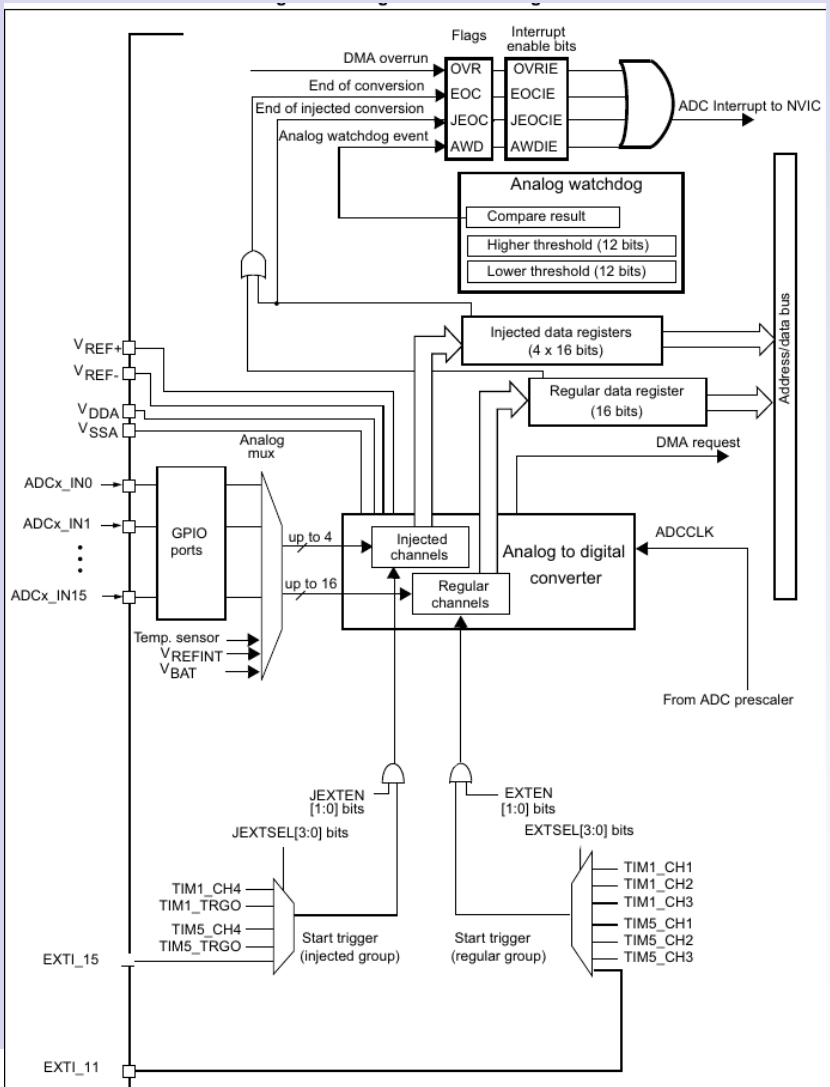
→ `long` occupe 8 octets (64 bits)

→ toujours *little endian*

Conclusion

Cette séparation permet d'utiliser

- outils de profilage et d'analyse de code (`lint`, `valgrind` ...)
- outils de test unitaire (`cunit`)
- un nouveau processeur avec le même algorithme de traitement



Unique convertisseur analogique-numérique : 1×12-bit à 2,4 MSPS

```
void init_adc(void)
{gpio_mode_setup (GPIOB, GPIO_MODE_ANALOG, →
      ↪GPIO_PUPD_NONE, GPIO0|GPIO1);

 adc_power_off (ADC1);
 adc_disable_scan_mode (ADC1);
// ADCCLOCK < 30 MHz, from APB2 => prescale →
      ↪tq APB2/DIV<30 MHz
 adc_set_clk_prescale (ADC_CCR_ADCPRE_BY4);
 adc_set_sample_time_on_all_channels (ADC1, →
      ↪ADC_SMPR_SMP_112CYC);
//si ADCCLOCK = 21 MHz, sampletime = 144 => →
      ↪Tconv = 7.4286us.
 adc_power_on (ADC1);
}

unsigned short read_adc (unsigned char →
      ↪channel)
{uint8_t channel_array[16];
 channel_array[0] = channel;
 adc_set_regular_sequence (ADC1, 1, →
      ↪channel_array); // used channel
 adc_start_conversion_regular (ADC1);
 while (!adc_eoc (ADC1));
 return(adc_read_regular(ADC1));
}
```