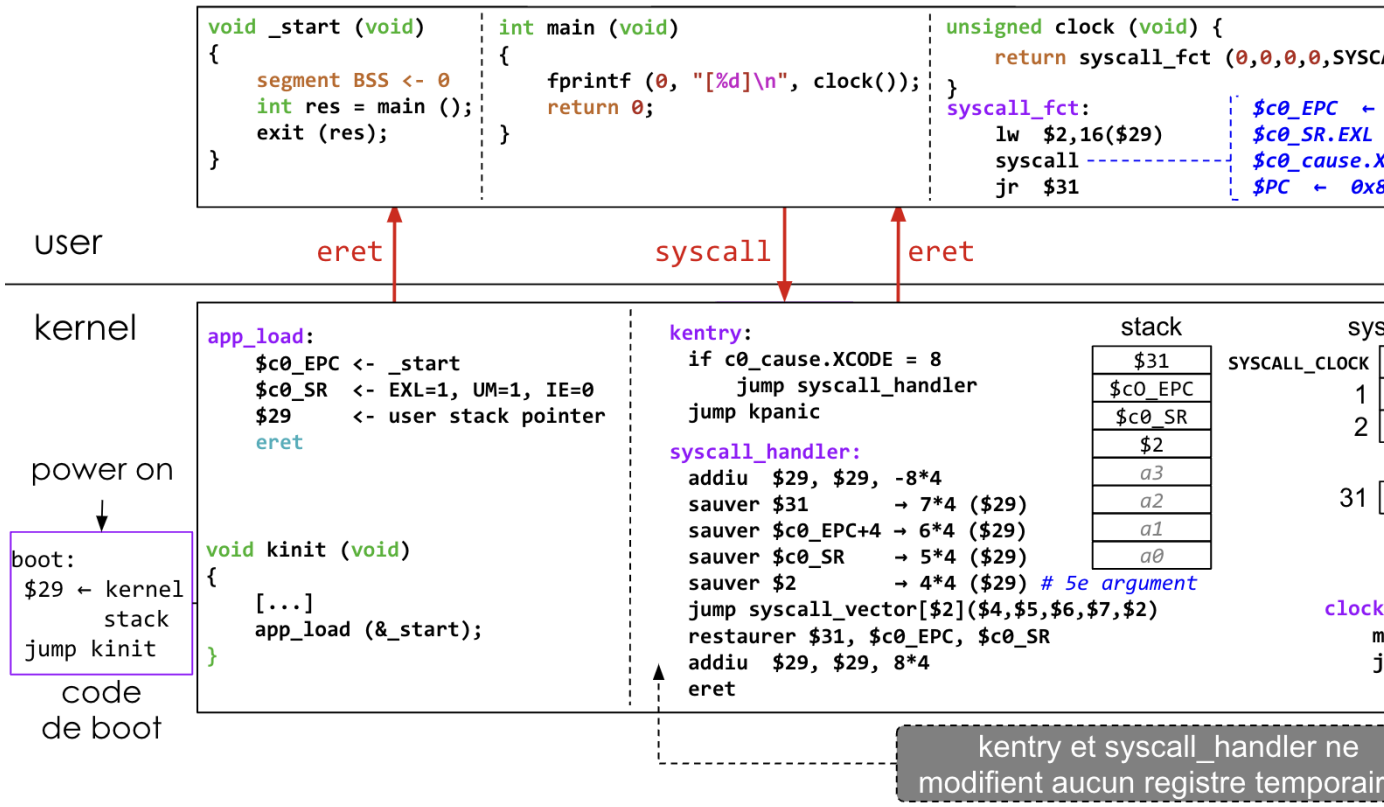
Application simple en mode utilisateur

Le schéma présenté rapidement au cours 10 (slides 26 à 31) et en détail dans l'annexe du cours 10 (slides 1 à 32) représente l'exécution d'une application utilisateur très simple dont le comportement est défini par la fonction `main()`.
L'exécution part du démarrage du SoC et va jusqu'à l'exécution de la fonction `exit()` qui stoppe l'avancée du programme.
L'objectif de ce schéma est de comprendre les interactions entre le code de boot, le noyau, l'application et les bibliothèques système. Le schéma ci-dessous ne contient pas l'intégralité du code pour des raisons évidentes de lisibilité, mais ce qui reste devrait suffire.



- En bas à gauche, c'est le code de boot qui, ici, se contente d'initialiser la pile d'exécution du noyau et d'entrer dans le noyau par la fonction `kinit()` (kernel init). Ce code s'exécute en mode `kernel`, mais il ne fait pas partie du noyau car, dans un vrai système, il doit charger le noyau depuis le disque dur, mais, ici, le noyau est déjà en mémoire alors c'est plus simple.
- En bas, c'est le noyau avec la fonction `kinit()` qui initialise les structures de données internes du noyau. Ici, il s'agit juste de mettre les variables globales non initialisées à 0, puis d'appeler la routine `app_load`

qui va entrer dans la première fonction de l'application utilisateur nommée `_start()`. Dans le noyau, sur la figure, on voit aussi la routine `kentry` qui est le point d'entrée du noyau pour la gestion des services. Actuellement, il n'y a que le gestionnaire d'appel système (`syscall`). Son comportement est succinctement résumé.
- En haut, c'est l'application utilisateur, décomposée en trois parties. La première à gauche est la fonction `_start()` appelée par le noyau au tout début de l'application. Cette fonction initialise à 0 les variables globales non initialisées dans le programme, puis elle appelle la fonction `main()`. Si on sort de la fonction `main()` avec un `return`, la fonction `_start` fait l'appel système `exit()`. La seconde partie au centre contient le code de l'utilisateur *(notez que la fonction `main()` ou l'une des fonctions appelées par la fonction `main()` peut demander une sortie anticipée de l'application en appelant directement `exit()`)*. Enfin, la troisième partie, à droite, c'est le code des bibliothèques système utilisées par l'application, ce sont elles qui font les appels système, ici, seule la fonction `clock()` est représentée.

Le but de cette séance est de s'intéresser à des points particulier de ce schéma :

- D'abord, nous abordons les 2 modes d'exécution du MIPS, kernel et user, utilisés respectivement pour le noyau et l'application utilisateur.
- Puis, nous voyons les passages du noyau à l'application et de l'application au noyau.
- Ensuite, nous nous intéressons à comment écrire le code C et assembleur pour contrôler le placement en mémoire.
- Enfin, il y a quelques quelques questions sur comment compiler pour faciliter la compréhension des TPs.

1. Les modes d'exécution du MIPS et les instructions *système*

Dans cette section, nous allons nous intéresser à ce que propose le processeur MIPS concernant les modes d'exécution. Ce sont des questions portant sur l'usage des modes en général et le comportement du MIPS vis-à-vis de ces modes en particulier.

Questions

1. Le MIPS propose deux modes d'exécution, rappelez quels sont ces deux modes, quel est le mode utilisé par le noyau et quel est le mode utilisé par l'application ? (C10 S6+S7)
2. Commencez par rappeler ce qu'est l'espace d'adressage du MIPS et dîtes ce que signifie «une adresse X est mappée dans l'espace d'adressage du MIPS».
   Est-ce qu'une adresse `X` mappée dans l'espace d'adressage du MIPS est toujours accessible (en lecture ou en écriture) quelque soit le mode d'exécution du MIPS. (C10 S7)
3. Le MIPS propose des registres à usage général (GPR *General Purpose Register*) pour les calculs ($0 à $31).
   Le MIPS propose un deuxième banc de registres **à l'usage du système d'exploitation** dans le coprocesseur 0.
   Chaque registre du coprocesseur `0` porte un nom correspondant à son usage, nous en avons vu 3 en cours (C10 S7+S10 à S14) : `c0_sr`, `c0_cause` et `c0_epc`.
   Donner leur numéro et leur rôle en une phrase ?
4. Les deux instructions qui permettent de manipuler les registres du coprocesseur `0` sont `mtc0` et `mfc0` (C10 S11).
   Quelle est leur syntaxe ? réponse dans Documentation MIPS Architecture et assembleur (4.)
   Est-ce qu'on peut manipuler ces registres de coprocesseur avec d'autres instructions ?

Écrivez les instructions permettant de faire `c0_epc = c0_epc + 4` (vous utiliserez le registre GPR `$8`)

5. Le registre status (`c0_sr` ou `$12` du coprocesseur `0`) est composé de plusieurs champs de bits qui ont chacun une fonction spécifique.
   Décrivez le contenu du registre status et le rôle des bits 0, 1 et 4 de l'octet 0. (C10 S12+S13+S15)
   réponse dans Documentation MIPS Architecture et assembleur (6.)
6. Le registre cause (`c0_cause` ou `$13` du coprocesseur `0`) est contient la *cause d'appel* du kernel.
   Dites à quel endroit est stockée cette *cause* et donnez la signification des codes 0, 4 et 8 (C10 S14+S15)
   réponse dans Documentation MIPS Architecture et assembleur (7.)
7. Le registre `c0_epc` (`$14`du coprocesseur `0`) est un registre 32 bits qui contient une adresse. Vous devriez l'avoir décrit dans la question 2.
   Expliquez pourquoi, dans le cas d'une exception, ce doit être l'adresse de l'instruction qui provoque une exception qui doit être stockée dans `c0_epc`? (C10 S15)
8. Nous avons vu trois instructions utilisables **seulement** lorsque le MIPS est en mode kernel, lesquelles? Que font-elles?
   Est-ce que l'instruction `syscall` peut-être utilisée en mode user? (C10 S11)
9. Quelle est l'adresse d'entrée dans le noyau au démarrage (à la sortie du code de boot) et après (depuis l'application) ? (C10 S15 S20)
10. Que se passe-t-il lorsqu'on entre dans le noyau après de l'exécution de l'instruction `syscall`? (C10 S15)
11. Quelle instruction utilise-t-on pour sortir du noyau afin d'entrer dans l'application ?
    Dîtes précisément ce que fait cette instruction dans le MIPS. (C10 S15)

2. Passage entre les modes kernel et user

Le noyau et l'application sont deux exécutables compilés indépendamment mais qui ne sont pas indépendants puisqu'on doit passer du noyau à l'application et inversement. Vous savez déjà que l'application appelle les services du noyau avec l'instruction `syscall`, voyons comment cela se passe vraiment depuis le code C. Certaines questions sont proches de celles déjà posées, c'est volontaire.

Questions

1. Comment imposer le placement d'adresse d'une fonction ou d'une variable en mémoire lorsqu'on produit un programme binaire exécutable, c'est-à-dire quel outil de la chaîne de compilation réalise ce placement en mémoire et avec quel fichier de configuration ? (C9 S18+S22+S23 C10 annexe S6+S8)
2. La première fonction d'un programme utilisateur est la fonction `_start()`, c'est elle qui appelle la fonction `main()`. La fonction `_start()` est donc dans le code de l'application, et non pas dans le noyau. Cependant le noyau doit connaître son adresse afin de pouvoir y sauter et ainsi entrer dans l'application.
   Dans le code ci-après, nous voyons comment la fonction `kinit()` appelle cette fonction `_start()`.
   Deux fichiers sont impliqués : `kinit.c` dans lequel se trouve la fonction `void kinit(void)` et `hcpua.S` dans lequel se trouve la fonction `void app_load(void *)` en charge d'appeler la fonction `_start()`.

```
kinit.c:
    void kinit (void)
    {
        [...]
        extern int _start;          # declaree ailleurs a une adresse connue de l'editeur
        app_load (&_start);         # appel de la fonction app_load definie dans hcpua.S
    }

hcpua.S:
    .globl app_load
```

```
app_load:
    mtc0   $4,      $14        # $4 contient l'argument
    li     $26,     0x12       # $26 <--  0x12 == 0b00010010
    mtc0   $26,     $12        # c0_sr <-- 0x12
    la     $29,    __data_end  # initialisation du pointeur de pile
    eret
```

Comme le noyau et l'application sont deux exécutables compilés indépendamment, il doit y avoir une convention permettant au noyau de savoir quelle est l'adresse de `start()`.
Où se trouve donc la fonction `_start()` et comment le kernel connaît-il son adresse ? (C10 S30+S32)
À quoi sert `.globl app_load` ? (C9 S18 C10 S20)
Quels sont les registres utilisés dans le code de `app_load` ?
Que savez-vous de l'usage de `$26` ? Quels sont les registres modifiés ? Expliquez pour chacun la valeur affectée.
Que fait l'instruction `eret` ? (C10 S15)

3. Que doit-on faire dans la fonction `_start()` avant l'exécution de la fonction `main()` du point de vue de l'initialisation? Et que doit-on faire dans la fonction `_start()` au retour de la fonction `main()` ? (C10 S24)
4. Nous avons vu que le noyau est sollicité par des demandes de service, quels sont-ils ? Nous rappelons que l'instruction `syscall` initialise le champs `xcode` du registre `c0_cause`, ainsi donc comment le noyau fait-il pour connaître la cause de son appel? (C10 S25)
5. On rappelle que `$26` et `$27` sont deux registres GPR temporaires ***réservés*** pour le noyau pour faire des calculs sans qu'il ait besoin de les sauvegarder dans la pile. **Ce ne sont pas des registres du coprocesseur 0** comme `c0_sr` ou `c0_epc`. En effet, l'usage de ces registres (`$26` et `$27`) par l'utilisateur ne provoque pas d'exception du MIPS. Toutefois, si le noyau est appelé alors il modifie ces registres et donc l'utilisateur perd leur valeur.
   Le code assembleur ci-après contient les instructions exécutées à l'entrée dans le noyau, quelle que soit la cause. Les commentaires présents dans le code ont été volontairement retirés (ils sont dans le cours et dans les fichiers du TP). La section `.kentry` est placée à l'adresse `0x80000000` par l'éditeur de lien, conformément à ce qui est demandé dans son fichier ldscript `kernel.ld`.

`kernel/hcpua.S`

```
15 .section    .kentry,"ax"
16 .org        0x180
22
23 kentry:
24
25     mfc0    $26,    $13
26     andi    $26,    $26,    0x3C
27     li      $27,    0x20
28     bne     $26,    $27,    kpanic
```

Ligne 16, la directive `.org DEP` (`.org` pour *origine*, `DEP` pour *déplassement*) permet de placer le pointeur de remplissage de la section courante à `DEP` octets du début de la section, ici `DEP = 0x180`. Pourquoi faire ça ? Aurait-on pu remplacer le `.org 0x180` par `.space 0x180` ? (C10 S5 et connaissance de l'assembleur) Expliquer les lignes 25 à 28. (C10 S20+S26+S31)

6. Le gestionnaire de `syscall` est la partie du code noyau qui gère l'exécution des services demandés par l'instruction `syscall`.
   Pour ce noyau, c'est un code en assembleur présent dans le fichier `kernel/hcpua.S` que nous allons détailler.
   Pour vous aider dans la compréhension du code, vous devez vous souvenir que l'instruction `syscall` réalise un peu un appel de fonction:
   - sauf que la fonction est définie par un *numéro de syscall* contenu dans le registre GPR `$2`;

- les arguments sont bien dans les registres $4 à $7, mais il y en a 4 au maximum;
- toutefois, la fonction appelante de syscall n'a pas réservé d'espace dans la pile pour les arguments, il faudra le faire;
- enfin, le registre `$2` contient la valeur de retour du syscall.

Le numéro contenu dans le registre `$2` est utilisé par le noyau pour indexer un tableau de pointeurs de fonctions de *syscall* nommé `syscall_vector[]`, ou vecteur de syscalls en français. Ce vecteur de syscalls est défini dans le fichier `kernel/ksyscalls.c`.
Les lignes `36` à `43` du code assembleur (`kernel/hcpua.S`) sont chargées d'allouer de la place dans la pile, nous allons voir pourquoi...

common/syscalls.h

```
1 #define SYSCALL_EXIT        0
  2 #define SYSCALL_READ        1
  3 #define SYSCALL_WRITE       2
  4 #define SYSCALL_CLOCK       3
  5 #define SYSCALL_NR          32
```

kernel/ksyscalls.c

```
void *syscall_vector[] = {
    [0 ... SYSCALL_NR - 1] = unknown_syscall,
    [SYSCALL_EXIT        ] = exit,
    [SYSCALL_READ        ] = tty_read,
    [SYSCALL_WRITE       ] = tty_write,
    [SYSCALL_CLOCK       ] = clock,
};
```

kernel/hcpua.S

```
 34 syscall_handler:
 35
 36     addiu   $29,    $29,    -8*4
 37     mfc0    $27,    $14
 38     mfc0    $26,    $12
 39     addiu   $27,    $27,    4
 40     sw      $31,    7*4($29)
 41     sw      $27,    6*4($29)
 42     sw      $26,    5*4($29)
 43     sw      $2,     4*4($29)
 44     mtc0    $0,     $12
 45
 46     la      $26,    syscall_vector
 47     andi    $2,     $2,     SYSCALL_NR-1
 48     sll     $2,     $2,     2
 49     addu    $2,     $26,    $2
 50     lw      $2,     0($2)
 51     jalr    $2
 52
 53     lw      $26,    5*4($29)
 54     lw      $27,    6*4($29)
 55     lw      $31,    7*4($29)
 56     mtc0    $26,    $12
 57     mtc0    $27,    $14
 58     addiu   $29,    $29,    8*4
 59     eret
```

Dessinez l'état de la pile après l'exécution de ces instructions. Que fait l'instruction ligne `44` et quelle conséquence cela a-t-il? Que font les lignes `46` à `51`? Et enfin que font les lignes `53` à `59` sans détailler ligne à ligne. (C10 S26+S31+S34)

3. Langage C pour la programmation système

La programmation en C, vous connaissez, mais quand on programme pour le noyau il y a des éléments de syntaxe ou des besoins spécifiques que vous ne connaissez peut-être pas. Pour répondre aux questions, vous devez avoir lu les transparents de l'annexe du cours 10, dans lesquels une séquence complète de code est détaillée du boot à exit.

Questions

1. En assembleur, vous utilisez les sections prédéfinies `.data` et `.text` pour placer respectivement les *data* et le *code*, mais vous pouvez créer vos propres sections avec la directive `.section` (nous avons utilisé cette possibilité pour la section `.boot`). Il est aussi possible d'imposer ou de créer des sections en langage C avec la directive `__attribute__((section("section-name")))`. La directive du C `__attribute__` permet de demander certains comportements au compilateur. Ici, c'est la création d'une section, mais il y a beaucoup d'attributs possibles (si cela vous intéresse vous pouvez regarder dans la ?doc de GCC sur les attributs. Comment créer la section `.start` en C ? (C10 S30 C10 annexe S8)
2. En C, vous savez que les variables globales sont toujours initialisées, soit explicitement dans le programme lui-même, soit implicitement à la valeur `0`. Les variables globales initialisées sont placées dans la section `.data` (ou plutôt dans l'une des sections `data` : `.data`, `.sdata`, `.rodata`, etc.) et elles sont présentes dans le fichier objet (`.o`) produit pas le compilateur. En revanche, les variables globales non explicitement initialisées ne sont pas présentes dans le fichier objet. Ces dernières sont placées dans un segment de la famille ?`.bss`. Le fichier ldscript permet de mapper l'ensemble des segments en mémoire. Pour pouvoir initialiser à `0` les segments `bss` par programme, il nous faut connaître les adresses de début et de fin où ils sont placés en mémoire.

   Le code ci-dessous est le fichier ldscript du kernel `kernel.ld` (nous avons retiré les commentaires mais ils sont dans les fichiers).

```
1 SECTIONS
2 {
3     .boot : {
4         *(.boot)
5     } > boot_region
6     .ktext : {
7         *(.text*)
8     } > ktext_region
9     .kdata : {
10        *(.*data*)
11        . = ALIGN(4);
12        __bss_origin = .;
13        *(.*bss*)
14        . = ALIGN(4);
15        __bss_end = .;
16    } > kdata_region
17 }
```

   Expliquez ce que font les lignes 11, 12 et 15 ? (C10 S32)
3. Nous connaissons les adresses des registres de périphériques. Ces adresses sont déclarées dans le fichier ldscript `kernel.ld`. Ci-après, nous avons la déclaration de la variable de ldscript `__tty_regs_map`. Cette variable est aussi utilisable dans les programmes C, mais pour être utilisable par le compilateur C, il

est nécessaire de lui dire quel type de variable c'est, par exemple une adresse d'entier ou une adresse de tableau d'entiers, Ou encore, une adresse de structure.

Dans le fichier `kernel.ld`:

```
__tty_regs_map   = 0xd0200000 ; /* tty's registers map, described in devices.h */
```

Dans le fichier `harch.c` :

```
12 struct tty_s {
 13     int write;          // tty's output address
 14     int status;         // tty's status address something to read if not null)
 15     int read;           // tty's input address
 16     int unused;         // unused address
 17 };
 18
 19 extern volatile struct tty_s __tty_regs_map[NTTYS];
```

Si `NTTYS` est une macro dont la valeur est `2`, quelle est l'adresse en mémoire `__tty_regs_map[1].read` ? À quoi servent les mots clés `extern` et `volatile` ? (C10 annexe S23 et connaissance du C)

4. Certaines parties du noyau sont en assembleur. Il y a au moins les toutes premières instructions du code de boot (démarrage de l'ordinateur) et l'entrée dans le noyau (kentry) après l'exécution d'un syscall. Le gestionnaire de syscall est écrit en assembleur et il a besoin d'appeler une fonction écrite en langage C. Ce que fait le gestionnaire de syscall est:
    - trouver l'adresse de la fonction C qu'il doit appeler pour exécuter le service demandé;
    - placer cette adresse dans un registre, nous utilisons le registre `$2`;
    - exécuter l'instruction `jal` (ici, `jal $2`) pour appeler la fonction.

   Que doivent contenir les registres `$4` à `$7` et comment doit-être la pile et le pointeur de pile? (Connaissance assembleur)

5. Vous avez appris à écrire des programmes assembleur, mais parfois il est plus simple, voire nécessaire, de mélanger le code C et le code assembleur. Dans l'exemple ci-dessous, nous voyons comment la fonction `syscall()` est écrite. Cette fonction utilise l'instruction `syscall`.
   Deux exemples d'usage de la fonction `syscall()` pris dans le fichier `tp2/4_libc/ulib/libc.c`.

```
 1 int fprintf (int tty, char *fmt, ...) // tty identifiant du terminal
 2 {                                     // fmt chaine format, suivie d'arguments option
 3     int res;
 4     char buffer[PRINTF_MAX];
 5     va_list ap;
 6     va_start (ap, fmt);                                 // définit le dernier argument
 7     res = vsnprintf(buffer, sizeof(buffer), fmt, ap); // remplit le buffer avec la ch
 8     res = syscall (tty, (int)buffer, 0, 0, SYSCALL_TTY_PUTS);  // ?  appel système
 9     va_end(ap);
10     return res;
11 }
12
13 void exit (int status)
14 {
15     syscall( status, 0, 0, 0, SYSCALL_EXIT);                    // ? appel système
16 }
```

   Le code de la fonction `syscall()` en **assembleur** est dans le fichier **C** :
   `tp2/4_libc/ulib/crt0.c`

```
1 // int syscall (int a0, int a1, int a2, int a3, int syscall_code)
  2 __asm__ (
  3 ".globl syscall     \n"
  4 "syscall:           \n"
  5 "   lw  $2,16($29)  \n"
  6 "   syscall         \n"
  7 "   jr  $31         \n"
  8 );
```

Combien d'arguments a la fonction `syscall()` ?
Comment la fonction `syscall()` reçoit-elle ses arguments ?
A quoi sert la ligne 3 de la fonction `syscall()` et que se passe-t-il si on la retire ?
Expliquer la ligne 5 de la fonction `syscall()`.
Aurait-il été possible de mettre le code de la fonction `syscall()` dans un fichier `.S` ? (C10 S31)

4. Génération du code exécutable (optionnel)

Pour simuler le logiciel, il faut produire deux exécutables. Nous utilisons, ici, un Makefile hiérarchique et des règles explicites. Cela sort du cadre de l'architecture, mais vous avez besoin de ce savoir-faire pour comprendre le code, alors allons-y.

Questions

1. Rappelez à quoi sert un Makefile? (C9 annexe S5 à S7)
2. Vous n'allez pas à avoir à écrire un Makefile complètement. Toutefois, si vous ajoutez des fichiers source, vous allez devoir les modifier en ajoutant des règles. Nous avons vu brièvement la syntaxe utilisée dans les Makefiles de ce TP. Les lignes qui suivent sont des extraits de `1_klibc/Makefile` (le Makefile de l'étape-1). Dans cet extrait, quelles sont la `cible` finale, les `cibles` intermédiaires et les `sources`? A quoi servent les variables automatiques de make? Dans ces deux règles, donnez-en la valeur. (C9 annexe S5 à S7)

```
kernel.x : kernel.ld obj/hcpua.o obj/kinit.o obj/klibc.o obj/harch.o
    $(LD) -o $@ -T $^
    $(OD) -D $@ > $@.s

obj/hcpua.o : hcpua.S hcpu.h
    $(CC) -o $@ $(CFLAGS) $<
    $(OD) -D $@ > $@.s
```

3. Dans le TP, à partir de la deuxième étape, nous avons trois répertoires de sources `kernel`, `ulib` et `uapp`. Chaque répertoire contient une fichier `Makefile` différent destiné à produire une `cible` différente grâce à une règle nommée `compil`, c.-à-d. si vous tapez `make compil` dans un de ces répertoires, cela compile les sources locales.
   Il y a aussi un Makefile dans le répertoire racine `4_libc`. Dans ce dernier Makefile, une des règles est destinée à la compilation de l'ensemble des sources dans les trois sous-répertoires. Cette règle appelle récursivement la commande `make` en donnant en argument le nom du sous-répertoire où descendre : `make -C <répertoire> [cible]` est équivalent à `cd <répertoire>; make [cible] ; cd ..`
   Ecrivez la règle `compil` du fichier `4_libc/Makefile`. (Ce n'est pas dit dans le cours, mais la question contient la réponse...)

```
4_libc/
??? Makefile        : Makefile racine qui invoque les Makefiles des sous-répertoires et q
??? common ?????????? répertoire des fichiers commun kernel / user
??? kernel ?????????? Répertoire des fichiers composant le kernel
?   ??? Makefile    : description des actions possibles sur le code kernel : compilation
```

```
??? uapp ??????????? Répertoire des fichiers de l'application user seule
?   ??? Makefile    : description des actions possibles sur le code user : compilation et
??? ulib ??????????? Répertoire des fichiers des bibliothèques système liés avec l'appli
    ??? Makefile    : description des actions possibles sur le code user : compilation et
```