

ARC TD6

QTRVSIM : un simulateur de l'architecture RISC-V (4h séance sur machine), 10 juin 2026

1 Mise en place

Nous allons utiliser le simulateur QtRVSim (<https://github.com/cvut/qtrvsim>) développé par l'Université de Prague à des fins pédagogiques pour comprendre le principe de fonctionnement des machines RISC ainsi que le pipeline des instructions dans un processeur RISC.

QtRVSim est un simulateur du jeu d'instruction du RISC-V (*instruction set simulator* : ISS). Nous nous contenterons de la version la plus simple du jeu d'instruction : RV32I (instructions riscv 32 bit en entier, c'est à dire sans multiplieur cablé). La description du jeu d'instruction du RISC-V est disponible en fin de ce sujet de TD ou, de manière complète, sur la page de l'organisation en charge du RISC-V (<https://riscv.org/>).

QtRVSim est installé sur les machines du département (commande `qtrvsim_gui`), vous pouvez l'installer sur votre machine (instructions sur le README du github : <https://github.com/cvut/qtrvsim>), ou vous pouvez simplement l'utiliser dans un navigateur avec la version compilée pour WebAssembly :

<https://comparch.edu.cvut.cz/qtrvsim/app/>.

Une publication décrivant brièvement le simulateur est disponible ici : <https://comparch.edu.cvut.cz/publications/ewC2022-Dupak-Pisa-Stepanovsky-QtRvSim.pdf>

2 Lancement de QtRVSim

Télécharger les exemples assembleur disponibles dans l'archive `qtrvsim-files.tar` sur Moodle. Nous allons commencer avec l'exemple intégré à QtRVSim qui modélise l'écriture sur le port série de la chaîne "Hello world".

1. Lancer QtRVSim, soit en utilisant la commande `qtrvsim_gui` dans un shell, soit dans un navigateur web (<https://comparch.edu.cvut.cz/qtrvsim/app/>), laissez cochée la case "No pipeline no cache" et cliquer sur Example.

vous devez voir quelque chose qui ressemble à ce qui montré en Figure 1, nous simulerons un RISC-V sans pipeline des instructions (i.e. 1 cycle par instruction) sur le programme donné dans l'onglet `template.S`. Si vous ne voyez pas l'architecture du processeur comme sur la figure 1, il est dans l'onglet "Core".

En haut de l'interface vous voyez l'état des 32 registres avec leurs deux noms (les 32 registres du RISC-V sont rappelés en fin de sujet de TP, page 7, notez qu'en activant l'option `Machine` → `Mnemonics registers`, vous pouvez voir les noms de registre de l'ABI et plutôt que les noms `x1`, `x2`, ...).

Sur la gauche vous voyez les instructions assembleur avec leur adresse en mémoire. Sur la droite en bas vous voyez l'état de la mémoire que vous pouvez explorer en entrant une adresse mémoire dans la case tout en bas à droite.

2. La première instruction à exécuter (dans le programme chargé en mémoire, colonne de gauche) est : `lui x10, 0xfffffc`, que fait-elle? quelle est l'instruction correspondante dans le programme `template.S` de la Fig. 2
(l'instruction `lui` est expliquée en annexe page 8 du sujet de TP).

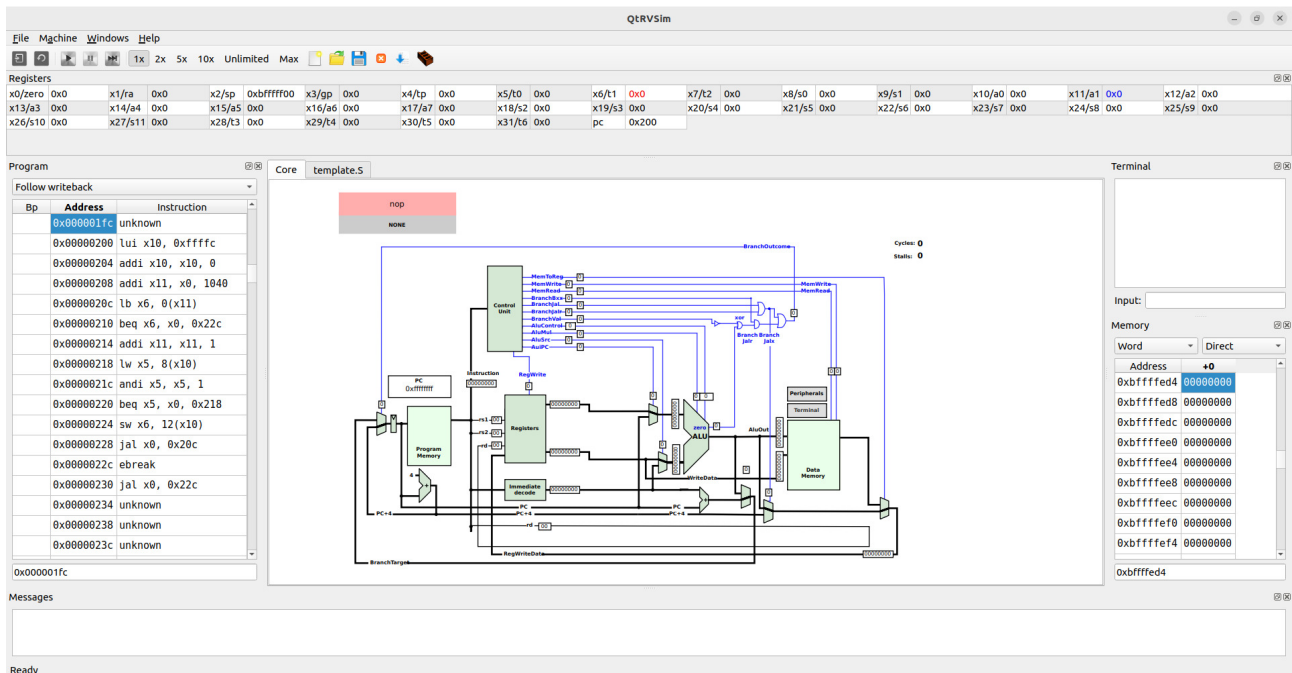


FIGURE 1 – Capture d'écran de l'interface de QtRVSim au démarrage

3. Cliquez **une fois** sur le bouton "step" : 

L'instruction lui x10 0xfffffc est maintenant grisée sur la gauche, c'est qu'elle vient d'être exécutée. Repérez sur la schématique du processeur (i.e. onglet "core"), la valeur du *program counter* PC. Repérez, toujours sur la schématique, la valeur en hexadécimal du registre d'instruction. Repérez la nouvelle valeur du registre x10. Quelle est la valeur du stack pointer SP?

4. Cliquez répétitivement sur le "step" : 

Vous voyez les instructions successives s'exécuter dans l'architecture RISC-V et vous voyez dans la fenêtre "Terminal" en haut à droite, s'afficher petit à petit "Hello world". Nous allons comprendre ce programme dans la question suivante.

3 Compréhension du programme `template.S`

1. Cliquer sur File → reload simulation et cliquer sur l'onglet `template.S` dans la fenêtre centrale. Le programme `template.S` commenté est montré en Fig. 2. Ce programme émule l'écriture d'une chaîne de caractères, caractère par caractère, sur un port série (qui est modélisé par le terminal en haut à droite de l'interface GUI de QtRVSim).

Il y a d'abord la définition d'un certain nombre de macros. par exemple celle-ci :

```
.equ SERIAL_PORT_BASE, 0xffffc000
```

qui définit l'adresse du port série comme étant 0xffffc000. Cela signifie que si l'on écrit un caractère à l'adresse 0xffffc000, ce caractère sera envoyé dans le terminal (il ne s'agit pas d'une caractéristique du processeur RISC-V mais plutôt de la carte mère sur laquelle va être soudée la puce du processeur RISC-V).

2. Repérez, sur le programme `template.S` dans QtRVSim, les sections de code (`.text`) et de données (`.data`), les directives `.org` indiquent à quelles adresses vont être chargées ces sections en mémoire. À quelle adresse commence le code? À quelle adresse sont rangée les données? Notamment la chaîne de caractère "Hello world". Allez explorer la mémoire pour retrouver ces données.
3. Sachant que le code ASCII de 'l' est 0x6C, celui de 'e' est 0x65 et celui de 'H' est 0x48, comprenez-vous le contenu de la case 0x410? (utiliser le navigateur de mémoire à droite en bas).
4. Lisez le programme de `template.S`, comparez avec les instructions dans la mémoire pour voir la correspondance et comprenez les étapes :

```

_start:

loop:
    li    a0, SERIAL_PORT_BASE           // load base address of serial port
    la    a1, text_1                     // load address of text

next_char:
    lb     t1, 0(a1)                     // load one byte after another
    beq    t1, zero, end_char             // is this the terminal zero byte
    addi   a1, a1, 1                     // move pointer to next text byte
tx_busy:
    lw     t0, SERP_TX_ST_REG_o(a0)      // read status of transmitter
    andi   t0, t0, SERP_TX_ST_REG_READY_m // mask ready bit
    beq    t0, zero, tx_busy              // if not ready wait for ready condition
    sw     t1, SERP_TX_DATA_REG_o(a0)    // write byte to Tx data register
    jal    zero, next_char                // unconditional branch to process next byte

end_char:
    ebreak // stop continuous execution, request developer interaction
    jal    zero, end_char

.org 0x400
.data

data_1:.word1, 2, 3, 4// example how to fill data words

text_1: .asciz  "Hello world.\n"        // store zero terminated ASCII text

```

FIGURE 2 – Exemple `template.S` de QtRVSim commenté. Les macros en majuscule sont définies au début du fichier (voir dans QtRVSim). Les registres du RISC-V sont détaillés en page 7

- (a) chargement de l'adresse du port série dans `a0` (on a vu que cette instruction est transformée en lui).
 - (b) chargement de l'adresse de la chaîne de caractère "Hello world" dans `a1`, cela est fait en utilisant l'instruction `auipc` (*Add Upper Imm to PC*), le PC valant $0x208=520$, on a bien $520+520=1040$ (sachant que $1040 = 0x410$ =l'emplacement des données du programme : `.data`).
 - (c) chargement du caractère pointé par `a1` dans `t1` (rappelez vous que `lb` ne charge qu'un octet).
 - (d) Si le caractère chargé dans `t1` est 0 on sort du programme par le label `end_char`.
 - (e) Sinon on incrémente `a1` de 1 (`a1` pointe alors sur le prochain caractère).
 - (f) les trois instructions suivant le label `tx_busy` sont là pour vérifier que le port série est disponible en réception, vous n'êtes pas censé les comprendre.
 - (g) on écrit le caractère sur le port série (instruction `sw t1, SERP_TX_DATA_REG_o(a0)`)
 - (h) on reboucle en branchant à l'étape (c) ci-dessus.
5. Suivez l'exécution pas à pas du programme à nouveau, et vérifiez l'affichage du caractère à chaque étape (g) ci-dessus.

4 version pipelinée du RISC-V

QtRVSim propose une simulation de la version pipelinée du RISC-V que nous avons vu en cours. pour cela il suffit de faire une nouvelle simulation en cliquant sur `file -> new simulation`, de sélectionner le champs "*Pipeline with hazard unit and cache*" et de cliquer sur "Example".

La nouvelle version de l'architecture pipelinée, ressemble à celle présentée en figure 3. Les grandes barres verticales sont les registres séparant les étapes du cycle de Von Neuman, on voit clairement les 5 étapes de pipeline. Lors de la simulation, à chaque step, vous verrez les chemins sélectionnés s'activer en gras dans l'architecture pour suivre le *datapath*.

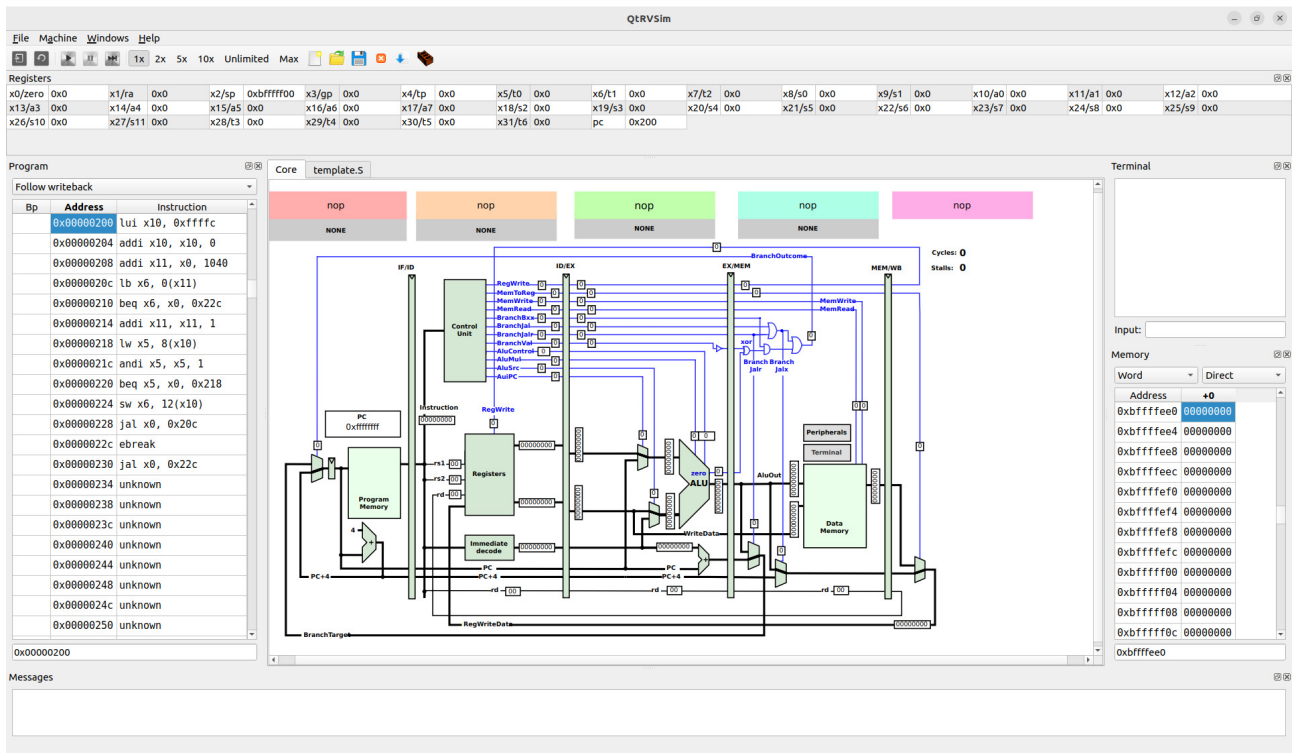


FIGURE 3 – Capture d'écran de l'interface de QtRVSim avec pipeline des instructions

1. Cliquer successivement pour "Step" vous voyez physiquement quelle instructions sont dans les zone *Instruction Fetch (IF)*, *Instruction Decode (ID)*, *Execute (Ex)*, *Memory (Mem)*, *Write back (WB)*.
2. Comprenez vous ce qu'il se passe lors de l'insertion du `nop` à l'exécution de l'instruction `addi a1, a1, 1`?
3. Observez ce qu'il se passe lorsqu'on arrive à l'instruction `ebreak`, pouvez vous comprendre ce qu'il se passe?

5 Utilisation de la pile : une simple boucle while

Cette section étudie l'exécution de ce programme C simple :

```
int dec(int i)
{
    int res;
    res = i-1;
    return res;
}

int main()
{
    dec(10);
    return 0;
}
```

Le code assembleur pour ce programme est affiché en Figure 4. Ce code a été généré par le compilateur pour RISC-V avec l'option -O0, voir l'encadré ci-dessous.

```

.globl _start
.globl __start

.org 0x00000200

.text
__start:
_start:
    addi    sp,sp,-16    # reserve 16 bytes in stack
    sw      ra,8(sp)     # Store ra in stack (ra means "return address")
    li      a5,10        # a5 <- 10
    call    dec          # call dec function: ra <- PC + 4, PC <- dec
    lw      ra,8(sp)     # Restore ra from stack
    addi    sp,sp,16     # Restore Stack Pointeur
end:
    jal zero, end        #infinite loop: program finished

dec:
    addi    sp,sp,-4     #reserve 4 bytes in stack
    sw      t1, 0(sp)    # Store t1 in stack (t1 is used in function)
    addi    t1,a5,-1     # t1 <- a5 - 1
    mv      a0,t1        # a0 <- t1 (a0 contains the result)
    lw      t1,0(sp)     # restore t1 from stack
    addi    sp,sp,4      # restore SP
    ret

#pragma qtrvsim tab core

```

FIGURE 4 – Simple while loop Risc-V assembly code generated from C-code (options -O0)

Générer du code pour QtRVSim

Générer du code assembleur avec le compilateur `gcc` se fait simplement avec l'option `-S`. Mais pour générer du code pour RISC-V, il faut un *cross-compilateur*, c'est à dire un compilateur qui s'exécute sur une machine Intel mais qui génère du code RISC-V. Cette chaîne de compilation est disponible pour linux, par exemple ici <https://github.com/riscv-collab/riscv-gnu-toolchain> ou plus simplement avec le paquet `gcc-riscv64-linux-gnu` sur Ubuntu (`gcc-riscv64-linux-gnu` est installé sur les machines du département).

Une fois le compilateur installé, il suffit de compiler le programme avec la commande suivante :

```
riscv64-linux-gnu-gcc -S whileLoop.c -o whileLoop.S
```

Si l'on fait ça, le code généré pour la fonction `main` est le suivant :

```
main:
    lia0,0
    ret
```

En effet le compilateur `riscv64-linux-gnu-gcc` a optimisé le code (optimisation `-O2` par défaut) et il a été capable de se rendre compte qu'à la fin de la boucle, `x` vaudrait 0, donc il a remplacé tout le programme par un simple `return 0`. C'est une bonne illustration de la puissance des optimisations des compilateurs aujourd'hui.

Pour éviter cette optimisation, on peut par exemple forcer à ne pas faire d'optimisation avec l'option `-O0` :

```
riscv64-linux-gnu-gcc -S whileLoop.c -o whileLoop.S -O0
```

Le code généré n'est toujours pas directement exécutable par QtRVSim parce qu'un certain nombre de directives mises en place par `gcc` ne sont pas comprises par QtRVSim, mais il est facile de les remplacer à la main et de garder le code assembleur, c'est ce qui est fait dans la figure 4

1. Repassez en mode *no pipeline, no cache* (*File* → *new simulation* → *start empty*)
2. Chargez le programme `whileLoopQtRVSim.S` dans le simulateur, pour cela :
 - (a) Fermez l'onglet `template.S` si il est encore ouvert (*File* → *Close source*)
 - (b) Chargez le programme `whileLoopQtRVSim.S` en cliquant sur le bouton *Open Source* : . le programme assembleur doit apparaître dans un nouvel onglet au centre.
 - (c) **Compiler** ce programme avec le bouton *compile source and update memory* :  (n'oubliez pas! sinon il n'est pas pris en compte pas `qtrvsim`).
 - (d) Lancer l'exécution pas à pas en appuyant sur *step*
3. Que fait l'instruction `call dec?`
4. Que font les instructions suivantes?

```
ret
jr ra
jalr zero,ra,0
```

5. Que fait l'instruction `addi sp, sp, -4?`
6. Que fait l'instruction `sw t1, 0(sp)?`
7. Allez vérifier que la valeur du registre `t1` du programme C est bien stockée dans la pile.
8. Comprenez vous maintenant le programme de la figure 4 complètement?

6 Écrivons de l'assembleur : une fonction simple

Dans cette partie, vous partirez du squelette de fichier assembleur `recurs_skeleton.S`

- programmez une fonction simple qui renvoie la valeur $i - 1$ ou i est l'argument de la fonction, appelez-la depuis le `main`. votre fonction devra suivre les règles suivantes :

1. L'argument sera mis dans le registre `a5`.
2. Le résultat sera mis dans le registre `a0`
3. La fonction utilisera le registre `t1` pour son calcul.
4. La fonction sauvegardera `t1` dans la pile avant de l'utiliser et restaurera sa valeur avant de sortir

7 Écrivons de l'assembleur : une fonction récursive

Dans cette partie, vous partirez du squelette de fichier assembleur `recurs_skeleton.S`, remplacer `call dec` par `call ser`

- programmez maintenant la fonction série des entiers : $ser(n) = \sum_{i=0}^n i$ de manière récursive : $ser(n) = ser(n-1) + n$ (on ne programme pas la factorielle parce qu'il n'y a pas de multiplieur câblé dans cette version du riscV mais si c'est trop facile, créer une fonction de multiplication entière *mul* et programmez factorielle!).

Pour cela il faut mettre en place la pile et faire le calcul comme dans la fonction précédente et en plus

A nouveau, l'argument sera mis dans le registre `a5`, le résultat sera mis dans le registre `a0`

1. partez du squelette de fichier assembleur `recurs_skeleton.S`
 2. réserver 8 octets sur la pile, 4 pour l'argument, 4 pour l'adresse de retour
 3. stockez l'argument i dans la pile
 4. stockez l'adresse de retour dans la pile (registre `ra`)
 5. tester si l'argument est nul
 6. si il est nul, allez en "fin" si il n'est pas nul calculez $i - 1$ dans le registre `a5`
 7. faite l'appel récursif
 8. récupérer le résultat `a0` et additionnez i avec ce que vous avez sauvegardé dans la pile
 9. mettre le résultat dans `a0`
 10. restaurez le registre `ra`
 11. libérez les 8 octets de la pile.
 12. retournez de la fonction avec l'instruction `ret`
- fin :
13. mettre 0 dans `a0`
 14. restaurez le registre `ra`
 15. libérez les 8 octets de la pile.
 16. retournez de la fonction avec l'instruction `ret`

- Calculer $ser(3)$ vérifiez le résultat, donner la formule du nombre de cycle pour $ser(n)$. jusqu'à quelle n peux t'on calculer $ser(n)$

A Appendix 1 : quick reference de l'ISA RISC-V

RISC-V card obtained from James Zhu from Berkeley University.

Registers

Register	ABI Name	Description	Saver
x0	zero	Zero constant	—
x1	ra	Return address	Caller
x2	sp	Stack pointer	Callee
x3	gp	Global pointer	—
x4	tp	Thread pointer	—
x5-x7	t0-t2	Temporaries	Caller
x8	s0 / fp	Saved / frame pointer	Callee
x9	s1	Saved register	Callee
x10-x11	a0-a1	Fn args/return values	Caller
x12-x17	a2-a7	Fn args	Caller
x18-x27	s2-s11	Saved registers	Callee
x28-x31	t3-t6	Temporaries	Caller
f0-7	ft0-7	FP temporaries	Caller
f8-9	fs0-1	FP saved registers	Callee
f10-11	fa0-1	FP args/return values	Caller
f12-17	fa2-7	FP args	Caller
f18-27	fs2-11	FP saved registers	Callee
f28-31	ft8-11	FP temporaries	Caller

RISC-V Instruction Set

Core Instruction Formats

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0	
funct7				rs2		rs1		funct3		rd		opcode		R-type
imm[11 :0]						rs1		funct3		rd		opcode		I-type
imm[11 :5]				rs2		rs1		funct3		imm[4 :0]		opcode		S-type
imm[12:10 :5]				rs2		rs1		funct3		imm[4 :1 11]		opcode		B-type
imm[31 :12]										rd		opcode		U-type
imm[20:10 :1 11 19 :12]										rd		opcode		J-type

RV32I Base Integer Instructions

Inst	Name	FMT	Usage	Description (C)
add	ADD	R	add rd, rs1, rs2	rd = rs1 + rs2
sub	SUB	R	sub rd, rs1, rs2	rd = rs1 - rs2
xor	XOR	R	xor rd, rs1, rs2	rd = rs1 ^ rs2
or	OR	R	or rd, rs1, rs2	rd = rs1 rs2
and	AND	R	and rd, rs1, rs2	rd = rs1 & rs2
sll	Shift Left Logical	R	sll rd, rs1, rs2	rd = rs1 << rs2
srl	Shift Right Logical	R	srl rd, rs1, rs2	rd = rs1 >> rs2
sra	Shift Right Arith*	R	sra rd, rs1, rs2	rd = rs1 >> rs2
slt	Set Less Than	R	slt rd, rs1, rs2	rd = (rs1 < rs2)?1:0
sltu	Set Less Than (U)	R	sltu rd, rs1, rs2	rd = (rs1 < rs2)?1:0
addi	ADD Immediate	I	addi rd, rs1, imm	rd = rs1 + imm
xori	XOR Immediate	I	xorii rd, rs1, imm	rd = rs1 ^ imm
ori	OR Immediate	I	orii rd, rs1, imm	rd = rs1 imm
andi	AND Immediate	I	andi rd, rs1, imm	rd = rs1 & imm
slli	Shift Left Logical Imm	I	slli rd, rs1, imm	rd = rs1 << imm[0:4]
srli	Shift Right Logical Imm	I	srli rd, rs1, imm	rd = rs1 >> imm[0:4]
srai	Shift Right Arith Imm	I	srai rd, rs1, imm	rd = rs1 >> imm[0:4]
slti	Set Less Than Imm	I	slti rd, rs1, imm	rd = (rs1 < imm)?1:0
sltiu	Set Less Than Imm (U)	I	sltiu rd, rs1, imm	rd = (rs1 < imm)?1:0
lb	Load Byte	I	lb rd, imm(rs1)	rd = M[rs1+imm][0:7]
lh	Load Half	I	lh rd, imm(rs1)	rd = M[rs1+imm][0:15]
lw	Load Word	I	lw rd, imm(rs1)	rd = M[rs1+imm][0:31]
lbu	Load Byte (U)	I	lbu rd, imm(rs1)	rd = M[rs1+imm][0:7]
lhu	Load Half (U)	I	lhu rd, imm(rs1)	rd = M[rs1+imm][0:15]
sb	Store Byte	S	sb rd, imm(rs1)	M[rs1+imm][0:7] = rs2[0:7]
sh	Store Half	S	sh rd, imm(rs1)	M[rs1+imm][0:15] = rs2[0:15]
sw	Store Word	S	sw rd, imm(rs1)	M[rs1+imm][0:31] = rs2[0:31]
beq	Branch ==	B	beq rs1, rs2, imm	if(rs1 == rs2) PC += imm
bne	Branch !=	B	bne rs1, rs2, imm	if(rs1 != rs2) PC += imm
blt	Branch <	B	blt rs1, rs2, imm	if(rs1 < rs2) PC += imm
bge	Branch ≥	B	bge rs1, rs2, imm	if(rs1 ≥ rs2) PC += imm
bltu	Branch < (U)	B	bltu rs1, rs2, imm	if(rs1 < rs2) PC += imm
bgeu	Branch ≥ (U)	B	bgeu rs1, rs2, imm	if(rs1 ≥ rs2) PC += imm
jal	Jump And Link	J	jal rd, imm	rd = PC+4; PC += imm
jalr	Jump And Link Reg	I	jalr rd, rs1, imm	rd = PC+4; PC = rs1 + imm
lui	Load Upper Imm	U	lui rd, imm	rd = imm << 12
auipc	Add Upper Imm to PC	U	auioc rd, imm	rd = PC + (imm << 12)
ecall	Environment Call	I	ecall	Transfer control to OS
ebreak	Environment Break	I	ebreak	Transfer control to debugger

Pseudo Instructions

Pseudoinstruction	Base Instruction(s)	Meaning
la rd, symbol	auipc rd, symbol[31:12] addi rd, rd, symbol[11:0]	Load address
l{b h w d} rd, symbol	auipc rd, symbol[31:12] l{b h w d} rd, symbol[11:0](rd)	Load global
s{b h w d} rd, symbol, rt	auipc rt, symbol[31:12] s{b h w d} rd, symbol[11:0](rt)	Store global
fl{w d} rd, symbol, rt	auipc rt, symbol[31:12] fl{w d} rd, symbol[11:0](rt)	Floating-point load global
fs{w d} rd, symbol, rt	auipc rt, symbol[31:12] fs{w d} rd, symbol[11:0](rt)	Floating-point store global
nop	addi x0, x0, 0	No operation
li rd, immediate	<i>Myriad sequences</i>	Load immediate
mv rd, rs	addi rd, rs, 0	Copy register
not rd, rs	xori rd, rs, -1	One's complement
neg rd, rs	sub rd, x0, rs	Two's complement
negw rd, rs	subw rd, x0, rs	Two's complement word
sext.w rd, rs	addiw rd, rs, 0	Sign extend word
seqz rd, rs	sltiu rd, rs, 1	Set if = zero
snez rd, rs	sltu rd, x0, rs	Set if $\neq$ zero
sltz rd, rs	slt rd, rs, x0	Set if < zero
sgtz rd, rs	slt rd, x0, rs	Set if > zero
fmv.s rd, rs	fsgnj.s rd, rs, rs	Copy single-precision register
fabs.s rd, rs	fsgnjx.s rd, rs, rs	Single-precision absolute value
fneg.s rd, rs	fsgnjn.s rd, rs, rs	Single-precision negate
fmv.d rd, rs	fsgnj.d rd, rs, rs	Copy double-precision register
fabs.d rd, rs	fsgnjx.d rd, rs, rs	Double-precision absolute value
fneg.d rd, rs	fsgnjn.d rd, rs, rs	Double-precision negate
beqz rs, offset	beq rs, x0, offset	Branch if = zero
bnez rs, offset	bne rs, x0, offset	Branch if $\neq$ zero
blez rs, offset	bge x0, rs, offset	Branch if $\leq$ zero
bgez rs, offset	bge rs, x0, offset	Branch if $\geq$ zero
bltz rs, offset	blt rs, x0, offset	Branch if < zero
bgtz rs, offset	blt x0, rs, offset	Branch if > zero
bgt rs, rt, offset	blt rt, rs, offset	Branch if >
ble rs, rt, offset	bge rt, rs, offset	Branch if $\leq$
bgtu rs, rt, offset	bltu rt, rs, offset	Branch if >, unsigned
bleu rs, rt, offset	bgeu rt, rs, offset	Branch if $\leq$, unsigned
j offset	jal x0, offset	Jump
jal offset	jal x1, offset	Jump and link
jr rs	jalr x0, rs, 0	Jump register
jalr rs	jalr x1, rs, 0	Jump and link register
ret	jalr x0, x1, 0	Return from subroutine
call offset	auipc x1, offset[31:12] jalr x1, x1, offset[11:0]	Call far-away subroutine
tail offset	auipc x6, offset[31:12] jalr x0, x6, offset[11:0]	Tail call far-away subroutine
fence	fence iorw, iorw	Fence on all memory and I/O

B Pour ceux que ça intéresse : analyse de code de Fibonacci (généré par le compilateur)

1. Visualisez le programme `fib.c` ci dessous, comprenez son exécution. Si vous voulez le compiler et l'exécuter, utilisez la commande suivante :

```
gcc fib.c -o fib
```

Puis exécutez le programme en tapant `./fib`

```
#include <stdio.h>

int fib (int i)
{
    if (i<=1) return(1);
    else return(fib(i-1)+fib(i-2));
}

int main (int argc, char *argv[])
{
    fib(2);
}
```

2. Charger la version assembleur dans QtRVSim, c'est le fichier `fib-00-QTRVSIM.S` (l'appel a `printf` a été commenté car il ne marche pas dans QtRVSim).
3. Comprenez le programme assembleur `fib-00-QTRVSIM.S`, il a été commenté en Fig. 5. Ce programme a été généré à partir du fichier `fig.c` (avec les `printf` commentés) par le cross compilateur `riscv64-linux-gnu-gcc` avec la commande :

```
riscv64-linux-gnu-gcc -S fib.c -O0 -o fib-00-QTRVSIM.S
```
4. Chargez et compilez le programme dans QtRVSim. Suivez l'exécution pas à pas en dessinant l'état de la pile, à partir du label `fib`, en supposant que le registre `$a0` contienne la valeur 2, argument transmis à `fib`, suivez les étapes suivantes :
 - Appuyez sur step jusqu'à l'appel de `fib` (instruction `jalr ra, 20(t1)` à l'adresse 0x228. dessinez la pile (a l'envers, i.e. grandes adresses en bas) à ce moment du programme. A quoi correspond ce `jalr`? que contient le registre `a0`?
 - Appuyer sur step pour visualiser les registres sauvegardés dans la pile, quels sont-ils et pourquoi sont-ils sauvegardés? ou est l'instruction de test `i<= 1`? allez jusqu'à cette instruction et dessinez la pile dans cet état.
 - Appuyer sur step jusqu'à l'instruction d'appel récursif à `fib` (adresse 0x288), quelle est la valeur de `a0` à ce moment là, et que représente cette valeur?
 - Appuyer 4 fois sur step et dessiner le nouvel état de la pile.
 - Appuyez sur step jusqu'à l'instruction de comparaison à 1 (`blt`), cette fois ci la fonction prend l'autre branche (puisque `i<=1`) et va simplement retourner 1. Visualisez pas à pas la restauration des registres `ra`, `s0` et `s1` quelle va être l'adresse de retour indiqué dans `ra`? Dessinez le nouvel état de la pile après le retour de l'appel `fib(1)`. ou est le résultat de l'appel `fib(1)`?
 - Continuer à dérouler le programme pour le deuxième appel récursif (`fib(0)`), quel est le résultat de l'appel à `fib(2)` et dans quel registre est-il mis. Dessinez la pile après le retour à la fonction `main`
5. Vérifier sur la figure 6 que vous comprenez bien l'évolution de la pile avec des appel de fonctions.
6. Comment peut-on voir l'assembleur x86 pour le programme `fib`.

```

fib:
    addi    sp,sp,-48    #set stack for fib (48 Bytes = 12 words)
    sw      ra,40(sp)    #store return adress in stack
    sw      s0,32(sp)    #store s0 in stack (callee saved)
    sw      s1,24(sp)    #store s1 in stack (callee saved)
    addi    s0,sp,48     #set frame pointer to old SP
    mv      a5,a0        #get function argument
    sw      a5,-36(s0)    #store argument (i) in stack
    lw      a5,-36(s0)    #? it seems that prev. instr. set a5 to 0
    sext.w  a4,a5         #a4 <- i
    li      a5,1         #a5 <- 1
    bgt     a4,a5,L2     # branch to L1 if i > 1
    li      a5,1         # (else branch) set R5 to 1 (result)
    j       L3           # branch L3

L2:
    lw      a5,-36(s0)    #get i (argument of fib)
    addiw   a5,a5,-1     #compute i-1
    sext.w  a5,a5        #useless ?
    mv      a0,a5        #set i-1 in argument register (s0)
    call    fib          #recursive call to fib(i-1)
    mv      a5,a0        #get result from recursive call fib(i-1)
    mv      s1,a5        #put result in s1
    lw      a5,-36(s0)    #get i (argument of fib)
    addiw   a5,a5,-2     #compute i-2
    sext.w  a5,a5        #useless ?
    mv      a0,a5        #set i-2 in argument register (s0)
    call    fib          #recursive call to fib(i-2)
    mv      a5,a0        #get result from recursive call fib(i-2)
    addw    a5,s1,a5      #a5 <- fib(i-1) + fib(i-2)
    sext.w  a5,a5        #useless?

L3:
    mv      a0,a5        #put result (1) in a0
    lw      ra,40(sp)    #restore return adresse
    lw      s0,32(sp)    #restore frame pointer
    lw      s1,24(sp)    #restore s1
    addi    sp,sp,48     #remove fib stack
    jr      ra           #return to caller code

```

FIGURE 5 – Code assembleur RiscV commenté correspondant au programme `fib.c` (generated from C-code options -O0)

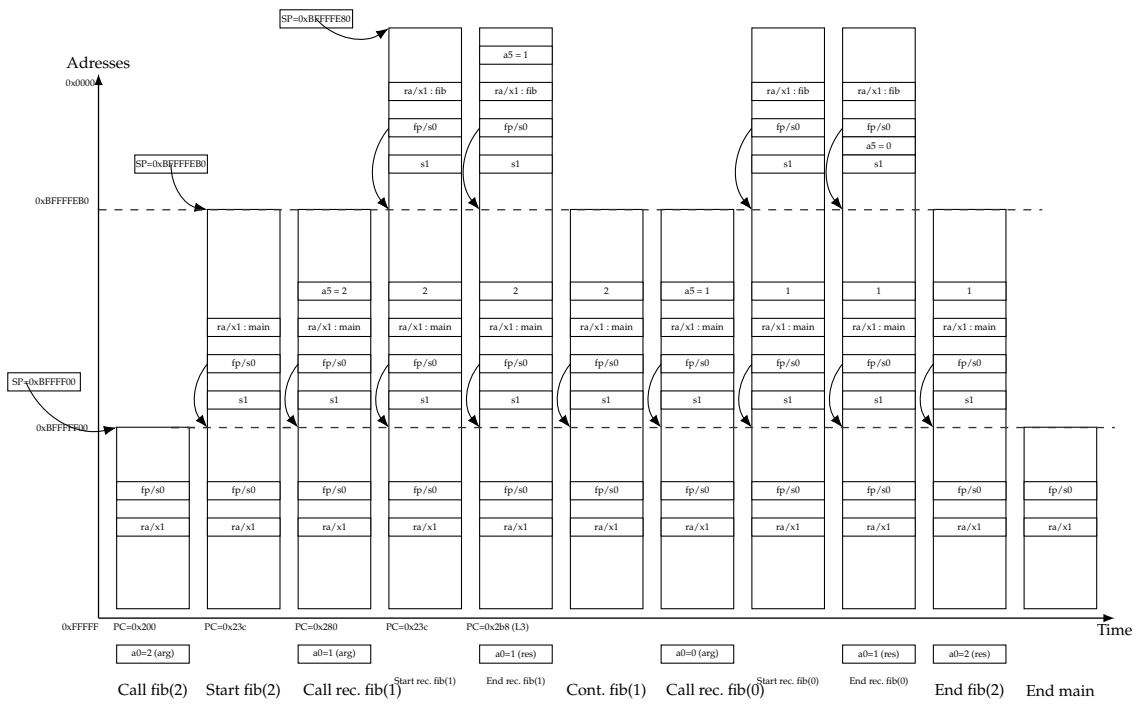


FIGURE 6 – Différents état de la pile lors de l'appel `fib(2)`