

Modélisation Transactionnelle des Systèmes sur Puces en SystemC

Ensimag 3A — filière SLE

Grenoble-INP

Usage of TLM Platforms

Matthieu Moy
(transparentes originaux : Jérôme Cornet)

Matthieu.Moy@imag.fr

2015-2016



Planning approximatif des séances

- ➊ Introduction : les systèmes sur puce
- ➋ Introduction : modélisation au niveau transactionnel (TLM)
- ➌ Introduction au C++
- ➍ Présentation de SystemC, éléments de base
- ➎ Communications haut-niveau en SystemC
- ➏ Modélisation TLM en SystemC
- ➐ TP1 : Première plateforme SystemC/TLM
- ➑ **Utilisations des plateformes TLM**
- ➒ TP2 (1/2) : Utilisation de modules existants (affichage)
- ➓ TP2 (2/2) : Utilisation de modules existants (affichage)
- ➔ Notions Avancé en SystemC/TLM
- ➕ TP3 (1/3) : Intégration du logiciel embarqué
- ➖ TP3 (2/3) : Intégration du logiciel embarqué
- ➗ TP3 (3/3) : Intégration du logiciel embarqué
- ➙ 05/01: Intervenant extérieur : Laurent Maillet Contoz (STMicroelectronics)
- ➚ Perspectives et conclusion

Outline

- 1 Reminder (?): Usage of TLM platforms
- 2 TLM for HW Verification
- 3 TLM for SW Development
- 4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation

Sommaire

- 1 Reminder (?): Usage of TLM platforms
- 2 TLM for HW Verification
- 3 TLM for SW Development
- 4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation

Benefits of TLM (compared to RTL)

- Fast (100X to 10000X acceleration compared to RTL)
- Lightweight modeling effort
- Same functionality (bit-accurate)

But ... !

- Drawbacks of TLM:

- ▶ “Less precise”
- ▶ Not synthesisable (\Rightarrow cannot replace RTL)
- ▶ So, what can this be used for?!?

But ... !

- Drawbacks of TLM:

- ▶ “Less precise”
- ▶ Not synthesisable (\Rightarrow cannot replace RTL)
- ▶ So, what can this be used for?!?

- Usage of TLM platforms:

- ▶ Software development, software debugging,
- ▶ Hardware verification,
- ▶ HW/SW partitioning, architecture exploration.

But ... !

- Drawbacks of TLM:

- ▶ “Less precise”
- ▶ Not synthesisable (\Rightarrow cannot replace RTL)
- ▶ So, what can this be used for?!?

- Usage of TLM platforms:

- ▶ Software development, software debugging,
- ▶ Hardware verification,
 - \Rightarrow Needs functional accuracy
- ▶ HW/SW partitioning, architecture exploration.
 - \Rightarrow Needs non-functional aspects (timing, energy, ...)

Sommaire

- 1 Reminder (?): Usage of TLM platforms
- 2 TLM for HW Verification
- 3 TLM for SW Development
- 4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation

Verification of an RTL IP

- Testing an IP
 - ▶ Run a test pattern on the RTL IP

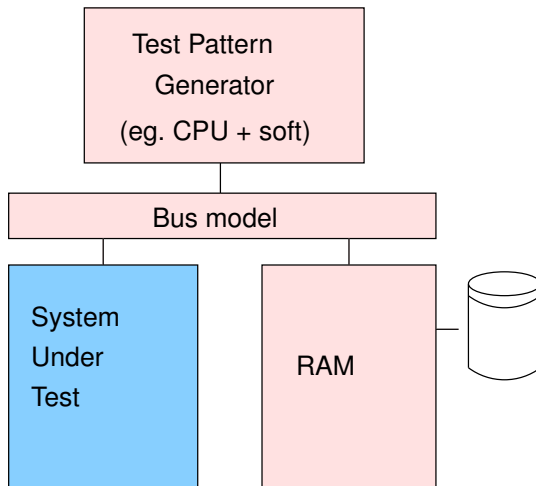
Verification of an RTL IP

- Testing an IP
 - ▶ Run a test pattern on the RTL IP
 - ▶ Run the same test pattern on the TLM IP
 - ▶ Compare

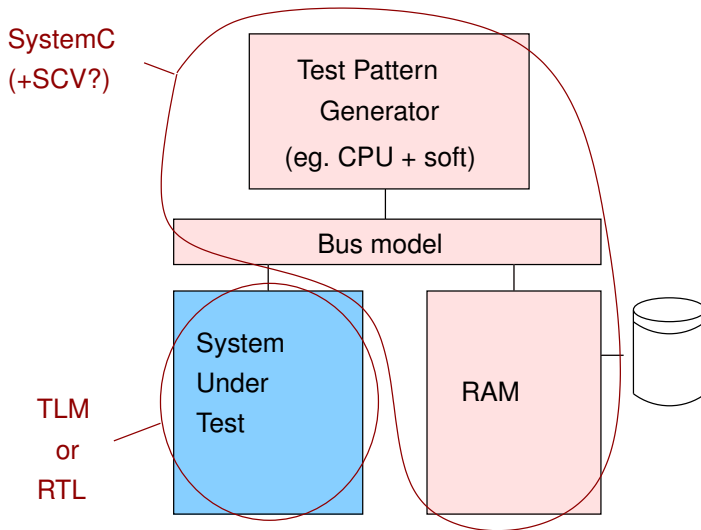
Verification of an RTL IP

- Testing an IP
 - ▶ Run a test pattern on the RTL IP
 - ▶ Run the same test pattern on the TLM IP
 - ▶ Compare
- What is a test-case
 - ▶ Often, 1 test-case = 1 piece of software (triggers read and write on the IP)

Typical Test Environment for IPs



Typical Test Environment for IPs



TLM and Verification

- SystemC/TLM provides the tool to
 - ▶ build the test environment
 - ▶ build reference models for IPs and platforms
 - ▶ generate test-patterns (Using the SCV library)
- Benefits over specific solutions
 - ▶ Cheap, no vendor lock-in
 - ▶ The same language is used by various people

Sommaire

- 1 Reminder (?): Usage of TLM platforms
- 2 TLM for HW Verification
- 3 TLM for SW Development
- 4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation

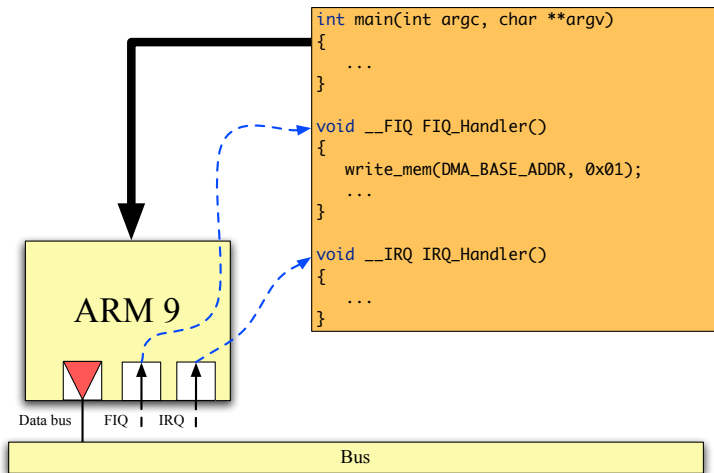
Reminder: principles of TLM

- Model what the software needs, and only that

Reminder: principles of TLM

- Model what the software needs, and only that
- Model
 - ▶ Behavior
 - ▶ Address map
 - ▶ Architecture
- Abstract away
 - ▶ Micro-architecture
 - ▶ Details of protocols

Interface of a CPU (= Low level API for Software)



2 ways to Integrate Software

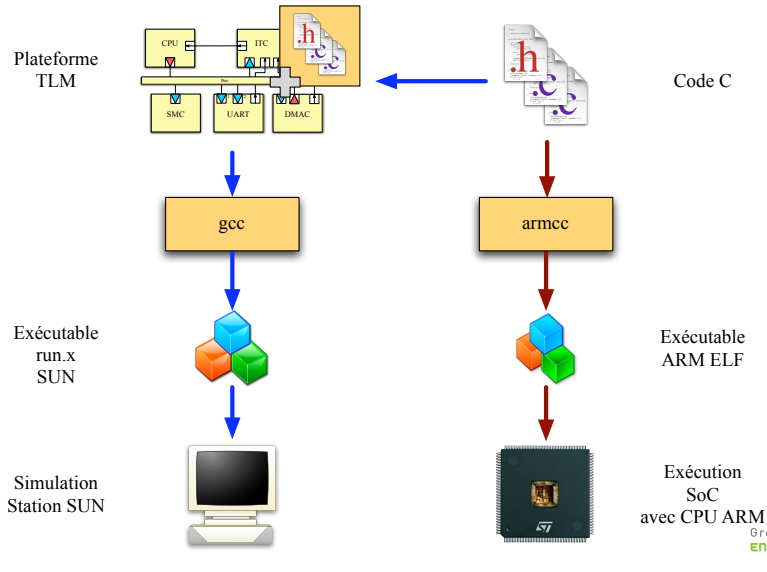
- Instruction Set Simulator (ISS)
 - ▶ Compile the software for the **target** CPU
 - ▶ Load and interpret the binary
- Native Wrapper
 - ▶ Compile the embedded software for the **host** CPU
 - ▶ Link it against the platform
 - ▶ Consider it as a SystemC process

Sommaire de cette section

3 TLM for SW Development

- Native Wrappers
- Instruction Set Simulators (ISS)
- ISS: How it Works
- Et les OS ?

Native Wrapper: Exemple



Problems to be Solved with Native Wrappers

- Integration in the TLM platform?
 - ▶ Several solutions: shared/static libraries, techniques from virtual-machines...

Problems to be Solved with Native Wrappers

- Integration in the TLM platform?
 - ▶ Several solutions: shared/static libraries, techniques from virtual-machines...
- Transactions generated by CPU?

Problems to be Solved with Native Wrappers

- Integration in the TLM platform?
 - ▶ Several solutions: shared/static libraries, techniques from virtual-machines...
- Transactions generated by CPU?
 - ▶ Memory access in embedded SW
 - ▶ Others... (see later)

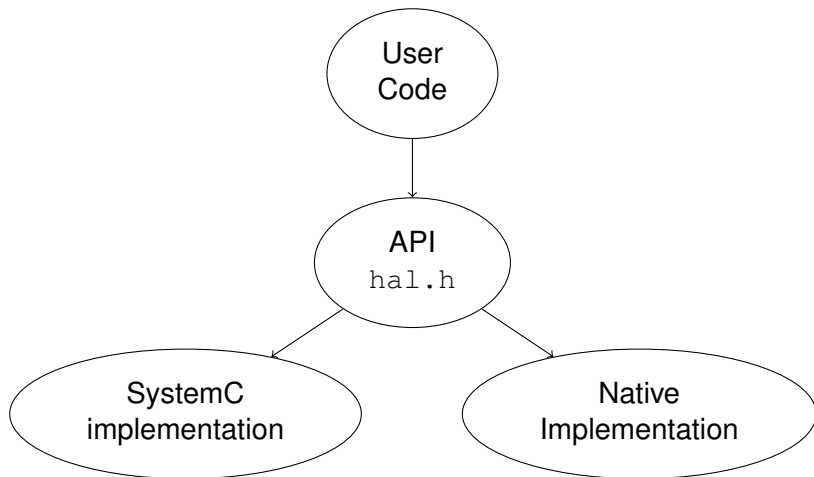
Problems to be Solved with Native Wrappers

- Integration in the TLM platform?
 - ▶ Several solutions: shared/static libraries, techniques from virtual-machines...
- Transactions generated by CPU?
 - ▶ Memory access in embedded SW
 - ▶ Others... (see later)
- Interrupt management

Problems to be Solved with Native Wrappers

- Integration in the TLM platform?
 - ▶ Several solutions: shared/static libraries, techniques from virtual-machines...
- Transactions generated by CPU?
 - ▶ Memory access in embedded SW
 - ▶ Others... (see later)
- Interrupt management
 - ▶ How to interrupt the execution of embedded software

A solution: One API, multiple implementations



A solution: One API, multiple implementations

- Hardware Abstraction Layer (HAL)
- Usage of the HAL API in the embedded software
 - ▶ Constraint imposed to programmers
 - ▶ Portable API: defined both for SystemC and real chips.
 - ▶ One primitive for each operation to perform that is different for SystemC and the real platform.

A solution: One API, multiple implementations

- Hardware Abstraction Layer (HAL)
- Usage of the HAL API in the embedded software
 - ▶ Constraint imposed to programmers
 - ▶ Portable API: defined both for SystemC and real chips.
 - ▶ One primitive for each operation to perform that is different for SystemC and the real platform.

- First example: access to the bus
(Memory and other target components)

```
void write_mem(addr_t addr, data_t data);  
data_t read_mem(addr_t addr);
```

- Force user to use `write_mem` and `read_mem` instead of direct access.
- Link with the right implementation depending on the execution platform.

A solution: One API, multiple implementations

- Hardware Abstraction Layer (HAL)
- Usage of the HAL API in the embedded software
 - ▶ Constraint imposed to programmers
 - ▶ Portable API: defined both for SystemC and real chips.
 - ▶ One primitive for each operation to perform that is different for SystemC and the real platform.
- First example: access to the bus
(Memory and other target components)

```
void write_mem(addr_t addr, data_t data);  
data_t read_mem(addr_t addr);
```

Question



Will we see all memory accesses?

SystemC implementation (for TLM simulation)

● Bus access

```
void write_mem(addr_t addr, data_t data)
{
    socket.write(addr, data);
}
```

```
data_t read_mem(addr_t addr)
{
    data_t data = 0;
    socket.read(addr, data);
    return data;
}
```


Native implementation (for ISS simulation and the final chip)

- Bus accesses

```
void write_mem(addr_t addr, data_t data)
{
    volatile data_t *ptr = addr;
    *ptr = data;
}
```

```
data_t read_mem(addr_t addr)
{
    volatile data_t *ptr = addr;
    return *ptr;
}
```

Deuxième problème : les interruptions

- Le problème :

Question



En quoi le code lié aux interruptions est-il différent du reste?

Deuxième problème : les interruptions

- Le problème :

- ▶ Pas de primitive pour gérer les interruptions en C ou C++
- ▶ Dépendant de l'architecture cible (primitives assembleur, ...)
- ▶ Au moins trois façons de gérer les interruptions :

- ★ ISR = Interrupt Service Routine

```
void irq_handler(void) { ... }
```

- ★ polling:

```
while (!condition) { /* nothing */ }
```

- ★ Attente explicite (instruction assembleur, opération bloquante, ...), via appel système si besoin

Deuxième problème : les interruptions

- Le problème :

- ▶ Pas de primitive pour gérer les interruptions en C ou C++
- ▶ Dépendant de l'architecture cible (primitives assembleur, ...)
- ▶ Au moins trois façons de gérer les interruptions :

- ★ ISR = Interrupt Service Routine

```
void irq_handler(void) { ... }
```

- ★ polling:

```
while (!condition) { /* nothing */ }
```

- ★ Attente explicite (instruction assembleur, opération bloquante, ...), via appel système si besoin

- ▶ Ça ne va pas marcher « tel quel » :

- ★ Le polling ferait une boucle infinie sans rendre la main
- ★ L'attente explicite ne compilera même pas en général

Deuxième problème : les interruptions

- Le problème :

- ▶ Pas de primitive pour gérer les interruptions en C ou C++
- ▶ Dépendant de l'architecture cible (primitives assembleur, ...)
- ▶ Au moins trois façons de gérer les interruptions :

- ★ ISR = Interrupt Service Routine

```
void irq_handler(void) { ... }
```

- ★ polling:

```
while (!condition) { /* nothing */ }
```

- ★ Attente explicite (instruction assembleur, opération bloquante, ...), via appel système si besoin

- ▶ Ça ne va pas marcher « tel quel » :

- ★ Le polling ferait une boucle infinie sans rendre la main
- ★ L'attente explicite ne compilera même pas en général

Question



Mais alors, comment faire ?

Emballage natif : Les interruptions

- Solution possible : dans l'API

- ▶ Une primitive pour « rendre la main, et attendre arbitrairement », `cpu_relax()` :

```
while (!condition) {  
    cpu_relax();  
}
```

Emballage natif : Les interruptions

- Solution possible : dans l'API

- ▶ Une primitive pour « rendre la main, et attendre arbitrairement », `cpu_relax()` :

```
while (!condition) {  
    cpu_relax();  
}
```

- ▶ Une primitive pour attendre une interruption, `wait_for_irq()` :

```
programmer_timer();  
wait_for_irq();  
printf("Le timer a expire\n");  
/* code hautement pas robuste, l'interruption  
   pourrait venir de n'importe ou. */
```

Les interruptions (l'API en SystemC)

- `cpu_relax()` (rendre la main) :

Les interruptions (l'API en SystemC)

- `cpu_relax()` (rendre la main) :

```
void NativeWrapper::cpu_relax() {  
    wait(1, SC_MS); /* temps arbitraire */  
}
```

- `wait_for_irq()` (attendre une interruption) :

Les interruptions (l'API en SystemC)

- `cpu_relax()` (rendre la main) :

```
void NativeWrapper::cpu_relax() {  
    wait(1, SC_MS); /* temps arbitraire */  
}
```

- `wait_for_irq()` (attendre une interruption) :

```
void NativeWrapper::wait_for_irq() {  
    if (!interrupt) wait(interrupt_event);  
    interrupt = false;  
}
```

- Et le signal d'interruption déclenche une `SC_METHOD` :

```
void NativeWrapper::interrupt_handler() {  
    interrupt = true; interrupt_event.notify();  
    int_handler(); /* surchargeable */  
}
```

Les interruptions (l'API pour la vraie puce)

- Il faut aussi implémenter l'API pour la vraie puce, pour que le logiciel tourne sans modifications sur le SoC.
- `cpu_relax()` (rendre la main) :

Les interruptions (l'API pour la vraie puce)

- Il faut aussi implémenter l'API pour la vraie puce, pour que le logiciel tourne sans modifications sur le SoC.
- `cpu_relax()` (rendre la main) :

```
void cpu_relax() {  
    /* Rien. Sur la puce, le temps passe de toutes  
       facons. Selon la puce, on peut/doit diminuer  
       la priorite du processus, vider le cache pour  
       s'assurer qu'on lit une valeur fraiche... */ }
```

- `wait_for_irq()` (attendre une interruption) :

Les interruptions (l'API pour la vraie puce)

- Il faut aussi implémenter l'API pour la vrai puce, pour que le logiciel tourne sans modifications sur le SoC.
- `cpu_relax()` (rendre la main) :

```
void cpu_relax() {  
    /* Rien. Sur la puce, le temps passe de toutes  
       facons. Selon la puce, on peut/doit diminuer  
       la priorite du processus, vider le cache pour  
       s'assurer qu'on lit une valeur fraiche... */ }
```

- `wait_for_irq()` (attendre une interruption) :

```
void wait_for_irq() {  
    /* specifique a la puce cible.  
       Peut-etre une instruction assembleur  
       dediee, peut-etre du polling, ... */ }
```

- ... et on enregistre `int_handler()` comme traitant d'interruption

Inconvénients de l'emballage natif

- Pas de support de l'assembleur
 - ▶ Compilation native impossible
 - ▶ Identification des communications?
- Pas de visibilité des « autres » transactions
 - ▶ Accès à la pile
 - ▶ Accès au tas
 - ▶ Accès instructions (fetch)
- Analyse de performance très difficile (comment ?)

Sommaire de cette section

3 TLM for SW Development

- Native Wrappers
- Instruction Set Simulators (ISS)
- ISS: How it Works
- Et les OS ?

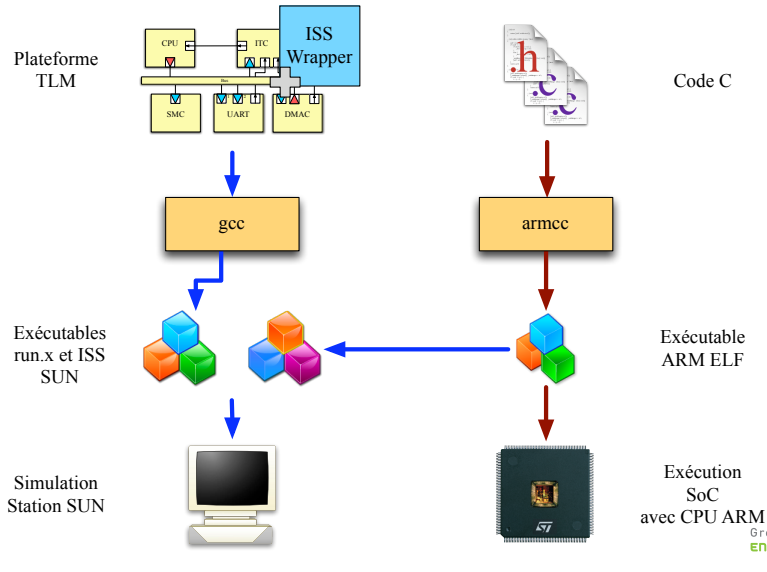
Présentation

- Simulateur de jeu d'instructions ou Instruction Set Simulator (ISS)
 - ▶ Émule les instructions d'un processeur donné
 - ▶ Simule éventuellement la microarchitecture (pipeline, caches, etc.)
- Plusieurs niveaux de fidélité à l'exécution
 - ▶ Instruction accurate
 - ▶ Cycle accurate
 - ▶ Cycle callable...

Utilisation

- En pratique : exécutable indépendant intégré par un emballage SystemC
 - ▶ Exécution sous forme d'un processus indépendant
 - ▶ Transformations des accès mémoires en transactions
 - ▶ Retransmission des interruptions à l'ISS
- Inconvénient : émulation \Rightarrow très lent

Utilisation d'un ISS : exemple



Sommaire de cette section

3 TLM for SW Development

- Native Wrappers
- Instruction Set Simulators (ISS)
- **ISS: How it Works**
- Et les OS ?

Simplest ISS: Binary Interpreter

```
pc = 0;
while (true) {
    ir = read(pc);
    pc += sizeof(ir);
    switch(OPCODE(ir)) {
        case ADD:
            regs[OP2(ir)] = regs[OP1(ir)]
                          + regs[OP2(ir)];

            break;
        case SUB: // ...
        case JMP:
            pc = ...; break;
        default: abort();
    }
    wait(period);
}
```

Example : MicroBlaze ISS (TP3)

- MicroBlaze = Xilinx “Softcore” (FPGA only)
- Pure C++ ISS available, open-source, \approx 1200 lines of code
 - ▶ Provides a `step()` method to execute one run of the loop,
 - ▶ Communicates with the outside world with `getDataRequest()`, `setDataResponse()`, `setIrq()`, ...
- Wrapped in an `SC_MODULE` connected to an `ensitlm` socket & bus.

```
while (true) {  
    // do read/write on the bus as needed  
    m_iss.step();  
    wait(period);  
}
```

Example : MicroBlaze ISS (TP3)

- MicroBlaze = Xilinx “Softcore” (FPGA only)
 - Pure C++ ISS available, open-source, \approx 1200 lines of code
 - ▶ Provides a `step()` method to execute one run of the loop,
 - ▶ Communicates with the outside world with `getDataRequest()`, `setDataResponse()`, `setIrq()`, ...
- ⇒ you **don't** have to code it
- Wrapped in an `SC_MODULE` connected to an `ensitlm` socket & bus.

```
while (true) {  
    // do read/write on the bus as needed  
    m_iss.step();  
    wait(period);  
}
```

⇒ you **will** have to code it

More advanced ISS: Dynamic Translation Techniques

- JIT (Just-In-Time) compiler Target→Bytecode→Host
- Compile basic blocks as it reaches them (\Rightarrow compile once, execute many times)
- Examples:
 - ▶ QEmu (Open Source, work needed to connect to SystemC)
 - ▶ SimSoC (research project, open-source)
 - ▶ OVP : Open Virtual Platform (Proprietary, commercially supported)
 - ▶ Many other modern “fast ISS”
- Still slower than native simulation (but can be faster than real chip)

Sommaire de cette section

3 TLM for SW Development

- Native Wrappers
- Instruction Set Simulators (ISS)
- ISS: How it Works
- Et les OS ?

Problème

- Intégration de logiciel tournant sur un système d'exploitation?

Problème

- Intégration de logiciel tournant sur un système d'exploitation?

Solution ISS

- ▶ Fonctionne...
- ▶ ...mais très lent

Problème

- Intégration de logiciel tournant sur un système d'exploitation?

Solution ISS

- ▶ Fonctionne...
- ▶ ...mais très lent

Solution emballage natif

- ▶ Nécessité de compiler l'OS pour la machine de simulation
- ▶ Portions de l'OS bas niveaux en assembleur...
- ▶ Correspondance appels bas niveaux/transactions?

OS Emulation (1/2)

- Émulation du système d'exploitation (OS Emulation)
 - ▶ Rien à voir avec l'émulation en général...
- Objectifs
 - ▶ Simulation rapide
 - ▶ Intégration transparente du logiciel embarqué
 - ▶ Production des transactions dans la plateforme...
- Généralisation de la couche d'abstraction du hardware des OS

OS Emulation (2/2)

- Exemple : Linux

- ▶ Portage « SystemC/C++ TLM » des fonctions du noyau
- ▶ Compilation du logiciel embarqué pour la machine de simulation
- ▶ Résultats :

Technique	Time for boot
ISS	3 min
Native	less than 3 s

Sommaire

- 1 Reminder (?): Usage of TLM platforms
- 2 TLM for HW Verification
- 3 TLM for SW Development
- 4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation

Sommaire de cette section

4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation

- Problems to be Solved
- Naive Approaches
- One approach: PV+T
- AT Models In Practice Today

Questions

- Rôle du temps en SystemC?
- Rôle du temps en TLM?

Questions

- Rôle du temps en SystemC?
 - ▶ `wait(temps)` change l'ordre des actions en SystemC
 - ▶ Mélange entre mesure du temps et fonctionnalité
- Rôle du temps en TLM?

Questions

- Rôle du temps en SystemC?

- ▶ `wait(temps)` change l'ordre des actions en SystemC
- ▶ Mélange entre mesure du temps et fonctionnalité

- Rôle du temps en TLM?

- ▶ Exécution correcte du logiciel embarqué non dépendante du temps... (**robustesse**)
- ▶ Fonctionnement correct d'une plateforme non dépendant du temps?
 - ★ Synchro par le temps : mauvaise pratique!

Questions

- Rôle du temps en SystemC?

- ▶ `wait(temps)` change l'ordre des actions en SystemC
- ▶ Mélange entre mesure du temps et fonctionnalité

- Rôle du temps en TLM?

- ▶ Exécution correcte du logiciel embarqué non dépendante du temps... (**robustesse**)
- ▶ Fonctionnement correct d'une plateforme non dépendant du temps?
 - ★ Synchro par le temps : mauvaise pratique!
 - ★ Mais... notion de **temps fonctionnel**

Questions

- Rôle du temps en SystemC?

- ▶ `wait(temps)` change l'ordre des actions en SystemC
- ▶ Mélange entre mesure du temps et fonctionnalité

- Rôle du temps en TLM?

- ▶ Exécution correcte du logiciel embarqué non dépendante du temps... (**robustesse**)
- ▶ Fonctionnement correct d'une plateforme non dépendant du temps?
 - ★ Synchro par le temps : mauvaise pratique!
 - ★ Mais... notion de **temps fonctionnel**
- ▶ Analyse d'architecture?

LT/AT/CA : présentation

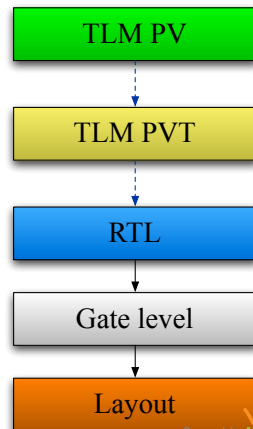
- Besoin conflictuels en TLM
- Timed/Untimed, Granularité...

TLM Programmer's View (PV) / Loosely Timed (LT)

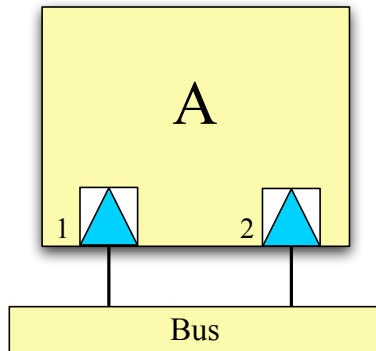
- Le temps n'a pas de signification
- Communications gros grain
- Utilisation : Développement du logiciel embarqué, Intégration Système

TLM Programmer's View with Time (PVT) / Approximately Timed (AT)

- Temps précis induits par la microarchitecture
- Communications à la taille du bus
- Utilisation : Évaluation d'Architecture

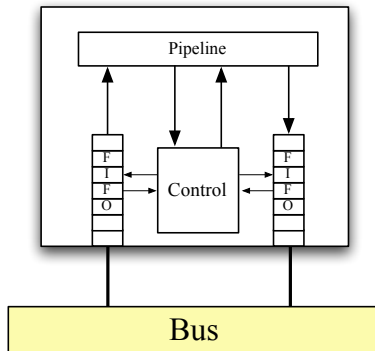


LT/AT : modèle de microarchitecture



- ① Granularité
- ② Fonctionnalité de microarchitecture (fifos, pipeline...)
- ③ Durées de traitement

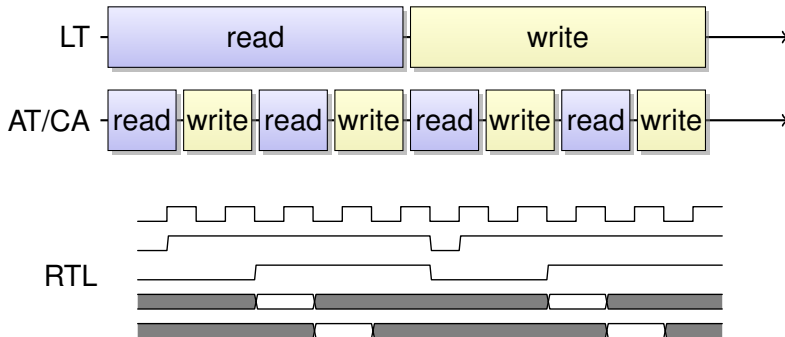
LT/AT : modèle de microarchitecture



- 1 Granularité
- 2 Fonctionnalité de microarchitecture (fifos, pipeline...)
- 3 Durées de traitement

LT/AT/CA : exemple de traces

- Exemple Transfert Mémoire :



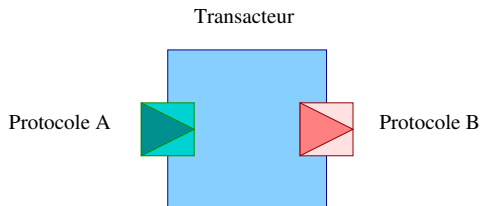
Sommaire de cette section

4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation

- Problems to be Solved
- **Naive Approaches**
- One approach: PV+T
- AT Models In Practice Today

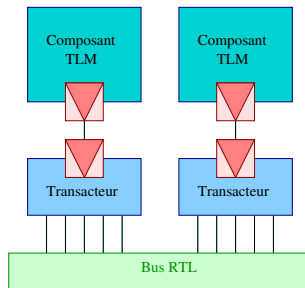
Transacteurs

- Transacteur = composant « pont » entre deux protocoles

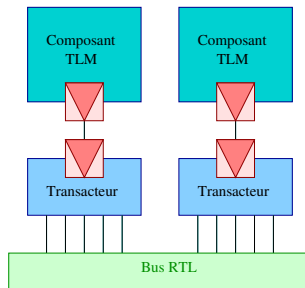


- Toutes combinaisons de A et B (TLM, RTL, différents protocoles)

PVT avec des transacteurs



PVT avec des transacteurs



Question



Où est la limitation?

PVT avec de l'instrumentation de code

Avant

```
Image i = read_image(addr1);  
Image i2 = encode_image(i);  
write_image(i2, addr2);
```

Après

```
Image i = read_image(addr1);  
wait(42, SC_MS); // time to read  
Image i2 = encode_image(i);  
wait(234, SC_MS); // time to encode  
write_image(i2, addr2);  
wait(54, SC_MS); // time to write
```

PVT avec de l'instrumentation de code

Avant

```
Image i = read_image(addr1);  
Image i2 = encode_image(i);  
write_image(i2, addr2);
```

Après

```
Image i = read_image(addr1);  
wait(42, SC_MS); // time to read  
Image i2 = encode_image(i);  
wait(234, SC_MS); // time to encode  
write_image(i2, addr2);  
wait(54, SC_MS); // time to write
```

Question



Où est la limitation?

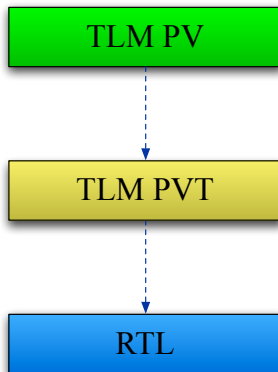
Conclusion intermédiaire

- Transacteurs, instrumentation : solutions très imparfaite, mais vraiment utilisées par des vrais gens.
- Faire du AT correctement est un problème difficile.

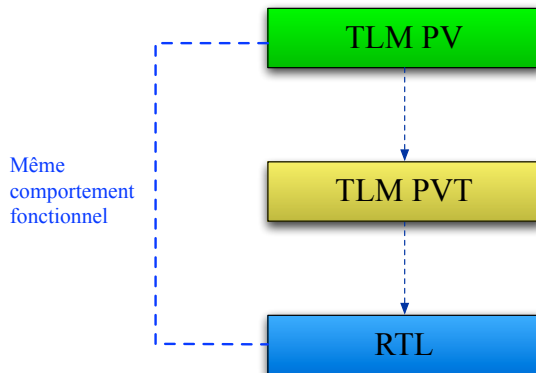
Sommaire de cette section

- 4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation
 - Problems to be Solved
 - Naive Approaches
 - One approach: PV+T
 - AT Models In Practice Today

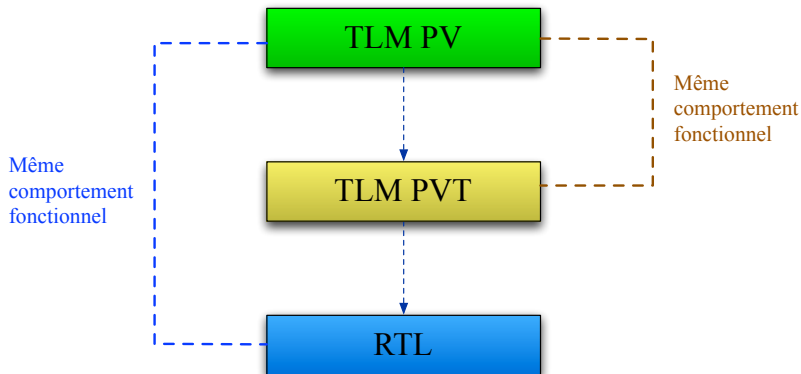
PV+T : contraintes



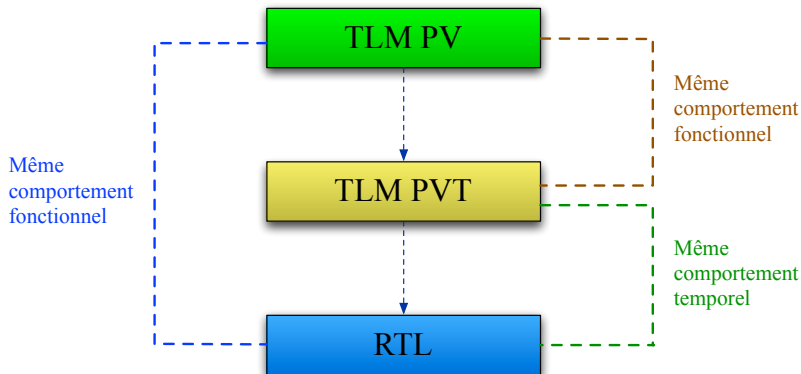
PV+T : contraintes



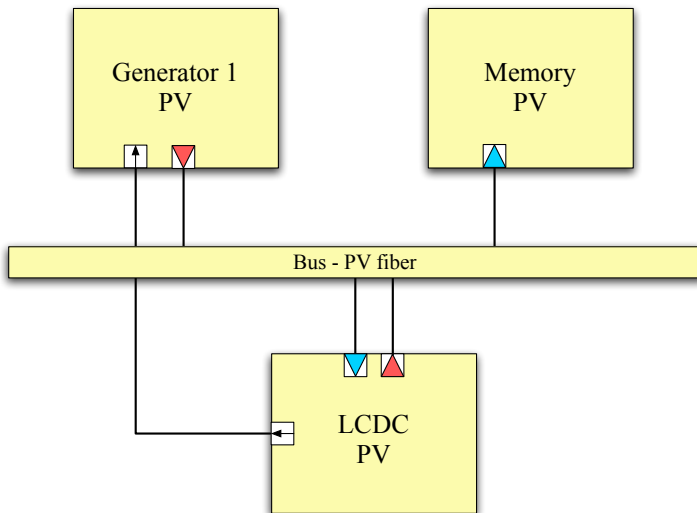
PV+T : contraintes



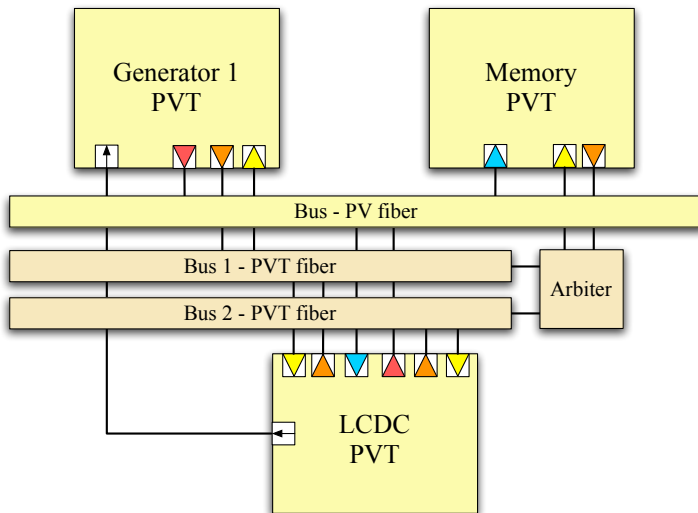
PV+T : contraintes



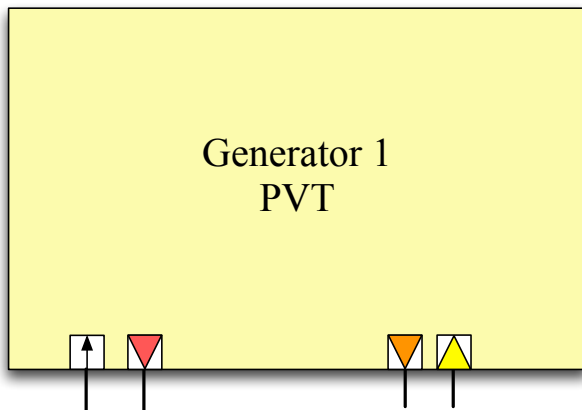
Exemple (PV \approx LT)



Exemple (PVT \approx AT)

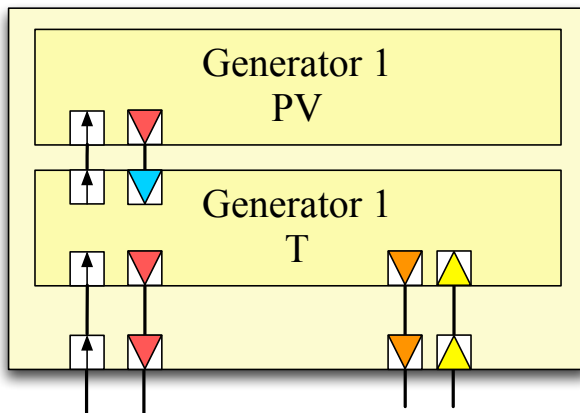


Module PVT



- Generator 1 PVT

Module PVT



- Generator 1 PVT

Sommaire de cette section

4 TLM for Architecture Exploration: Performance Evaluation

- Problems to be Solved
- Naive Approaches
- One approach: PV+T
- AT Models In Practice Today

AT Models In Practice Today

- No perfect solution exist
 - Precise timing requires
 - ▶ Important modeling effort
 - ▶ Slower simulation compared to LT or untimed
- ⇒ Cost/benefit not as good as LT
- Some people prefer RTL (+ Co-simulation/co-emulation/...)

Different Levels of Timing Precision

- Cycle accurate, Bit Accurate (CABA)
- Approximately-timed ($AT \approx PVT$) :
Tries to be timing-accurate.
- Loosely-timed ($LT \approx PV$) :
Doesn't target timing accuracy, but can use time to work (e.g. timers)
- Purely untimed:
Purely asynchronous execution, nothing relies on timing.