

# Modélisation Transactionnelle des Systèmes sur Puces en SystemC Ensimag 3A — filiale SLE Grenoble-INP Usage of TLM Platforms

Matthieu Moy  
(transparents 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 : Jérôme Cornet
- ➛ Perspectives et conclusion

## Outline

- ➊ Reminder (?): Usage of TLM platforms
- ➋ TLM for HW Verification
- ➌ TLM for SW Development
- ➍ 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)

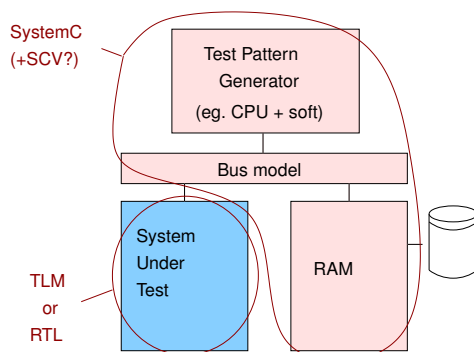
## But ... !

- Drawbacks of TLM:
  - "Less precise"
  - Not synthesisable (⇒ cannot replace RTL)
  - So, what can this be used for?!?
- Usage of TLM platforms:
  - Software development, software debugging,
  - Hardware verification,
    - ⇒ Needs functional accuracy
  - HW/SW partitioning, architecture exploration.
    - ⇒ Needs non-functional aspects (timing, energy, ...)

## 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



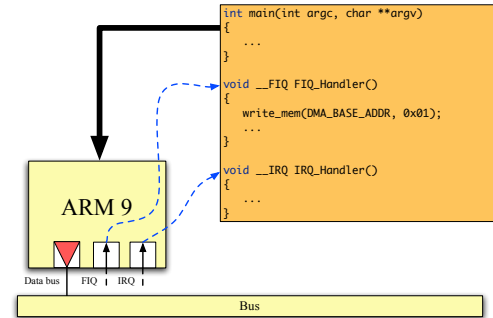
## TLM and Verification

- 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
  - The same language is used by various people

## Reminder: principles of TLM

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

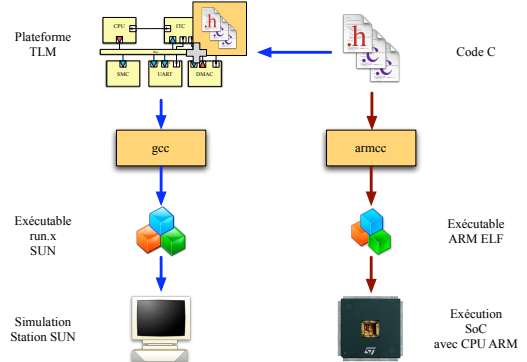
## Interface of a CPU (= Low level API for Software)



## 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

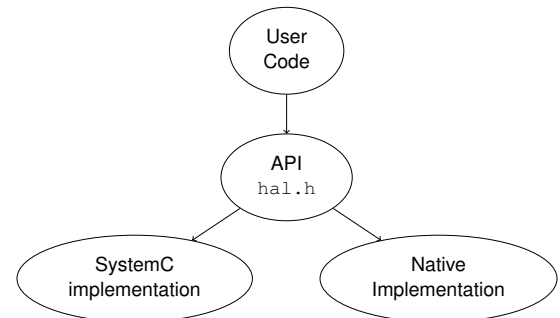
## Native Wrapper: Exemple



## 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.
- 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.

### 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 ?

- ▶ 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 compilerait même pas en général

## 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 expiré\n");
/* code hautement pas robuste, l'interruption
   pourrait venir de n'importe où. */
```

## 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) :

```
void cpu_relax() {
    /* Rien. Sur la puce, le temps passe de toutes
       façons. Selon la puce, on peut/doit diminuer
       la priorité du processus, vider le cache pour
       s'assurer qu'on lit une valeur fraîche... */
}
```
- `wait_for_irq()` (attendre une interruption) :

```
void wait_for_irq() {
    /* spécifique à la puce cible.
       Peut-être une instruction assembleur
       dédiée, peut-être 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 ?)

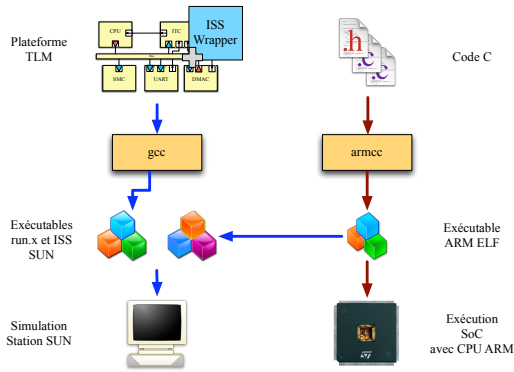
## Présentation

- 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 ⇒ très lent

## Utilisation d'un ISS : exemple



## Simplest ISS: Binary Interpreter

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

## 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

## 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

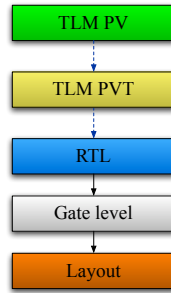
- Besoin conflictuels en TLM
- Timed/Untimed, Granularité...

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

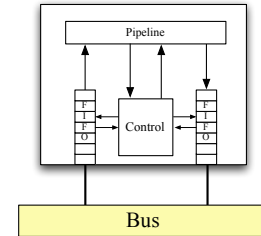
- Le temps n'a pas de signification
- Communications gros grain
- Utilisation : Développement du logiciel embarqué, Intégration Système

### 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



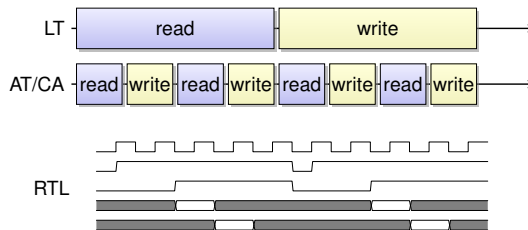
## LT/AT : modèle de microarchitecture



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

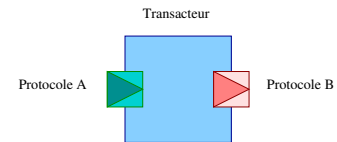
## LT/AT/CA : exemple de traces

- Exemple Transfert Mémoire :



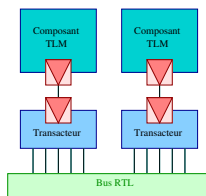
## Transacteurs

- Transacteur = composant « pont » entre deux protocoles



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

## 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
```

### Question

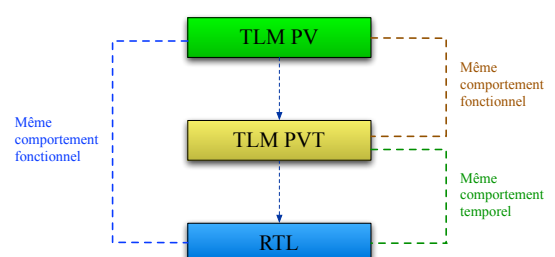


Où est la limitation?

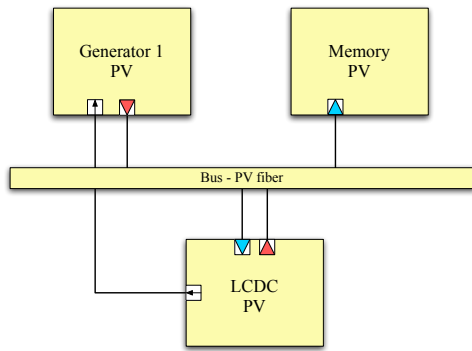
## Conclusion intermédiaire

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

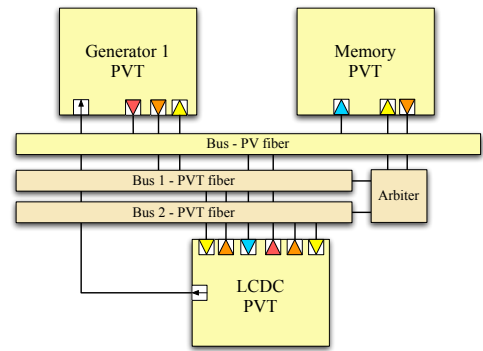
## PV+T : contraintes



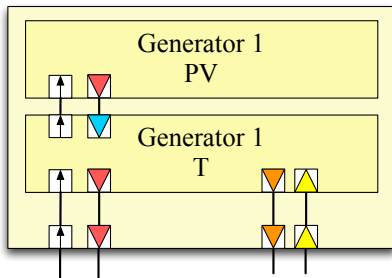
### Exemple (PV $\approx$ LT)



### Exemple (PVT $\approx$ AT)



### Module PVT



- Generator 1 PVT

### 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.