

Modélisation Transactionnelle des Systèmes sur Puce avec SystemC

Phelma 3A — filière SEOC

Grenoble-INP

Éléments de base

Frédéric Pétrot

frederic.petrot@univ-grenoble-alpes.fr

2022-2023



Planning des séances

- 05/12/22 (FP) CM1 Introduction : systèmes sur puce et modélisation au niveau transactionnel
- 14/12/22 (FP) CM2 Introduction au C++ et présentation de SystemC
- 14/12/22 (FP) CM3 Communications haut-niveau et modélisation TLM en SystemC
- 04/01/23 (FP) CM4 Utilisations des plateformes TLM et Notions Avancées en SystemC/TLM
- 04/01/23 (FP) TP1 (1/1) : Plateforme matérielle SystemC/TLM
- 09/01/23 (OM) CM5 Synthèse d'architecture
- 09/01/23 (OM) TP3 (1/2) : Synthèse de haut niveau et génération de circuits numériques
- 09/01/23 (OM) TP4 (2/2) : Synthèse de haut niveau et génération de circuits numériques
- 16/01/23 (FP) CM6 Intervenant extérieur : Jérôme Cornet (STMicroelectronics)
- 18/01/23 (FP) TP2 (1/2) : Intégration du logiciel embarqué
- 28/01/23 (FP) TP2 (2/2) : Intégration du logiciel embarqué

Sommaire

- 1 Présentation
- 2 SystemC : Fondamentaux
- 3 Modèle d'exécution, scheduler : simulation à évènements discrets

Sommaire

- 1 Présentation
- 2 SystemC : Fondamentaux
- 3 Modèle d'exécution, scheduler : simulation à évènements discrets

Sommaire de cette section

- 1 **Présentation**
 - Motivations
 - SystemC

Motivations (1/2)

- VHDL, Verilog standardisés
(IEEE 1076-xxxx, IEEE 1364-xxxx)
- Langage de conception système :
 - ▶ Plusieurs niveaux d'abstraction (> RTL)
 - ▶ Intégration matériel et logiciel
 - ▶ Spécification exécutable
 - ▶ Simulation rapide

Motivations (2/2)

- Conception système : tout un monde de langages...
 - ▶ Handel C (Celoxica)
 - ▶ SystemVerilog (Accellera, Synopsys)
 - ▶ SpecC (UC Irvine)
 - ▶ Ptolemy (Berkeley)...
- Besoins du monde industriel
 - ▶ Langage (re)connu
 - ▶ Supporté par les vendeurs d'outils (CAD vendors)
 - ▶ Indépendant d'un vendeur ou d'une université en particulier

Sommaire de cette section

- 1 Présentation
 - Motivations
 - SystemC

SystemC



- Proposition de Synopsys, Cadence et CoWare
- Langage... ou bibliothèque ?
- Concrètement
 - ▶ Ensemble de classes C++
 - ▶ Noyau de simulation (**scheduler**)
- Open source (licence type BSD)
- Standardisé
 - ▶ Accellera Systems Initiative (ASI), anciennement Open SystemC Initiative (OSCI)
 - ▶ IEEE 1666 (Décembre 2005, révisée en 2011)

SystemC : versions

- Petit historique
 - ▶ 2000 : SystemC 1.0 (RTL)
 - ▶ 2001 : SystemC 2.0 (Communications abstraites)
 - ▶ 2004 : Débuts de la bibliothèque **TLM OSCI**
 - ▶ Mars 2007 : **SystemC 2.2** (meilleur support TLM, etc.)
 - ▶ Juin 2008 : TLM 2.0
- 2011 : norme IEEE révisée
 - ▶ Contrôle des processus (suspend/resume, ...) pour modélisation des OS
 - ▶ Canaux primitifs « Thread-safe »
 - ▶ TLM 2.0 intégré au standard
- 2012 : SystemC 2.3
 - ▶ implémente IEEE 1666-2011 (y compris TLM 2.0)
- 2014 : SystemC 2.3.1 (bugfixes)

SystemC : contenu

- Organisation

Methodology-Specific Libraries <i>Master/Slave library, etc.</i>	Layered Libraries <i>Verification library</i> <i>TLM library, etc.</i>
Primitive Channels <i>signal, fifo, mutex, semaphore, etc.</i>	
Structural elements <i>modules</i> <i>ports</i> <i>interfaces</i> <i>channels</i>	Data Types <i>4-valued logic</i> <i>Bits and Bit Vectors</i> <i>Arbitrary Precision Integers</i> <i>Fixed-point types</i>
Event-driven simulation <i>events</i> <i>processes</i>	
C++ Language Standard	

Sommaire

- 1 Présentation
- 2 SystemC : Fondamentaux
- 3 Modèle d'exécution, scheduler : simulation à évènements discrets

Sommaire de cette section

- 2 **SystemC : Fondamentaux**
 - **Types de base**
 - Temps simulé
 - Composants
 - Connexions entre composants
 - Processus

Quelques types de base...

- Valeurs logiques simples

- ▶ `bool` : type C++ natif, valeurs `true` et `false`
- ▶ `sc_bit` : valeurs 0 et 1
- ▶ `sc_logic` : quatre valeurs possibles
 - ★ '0', '1' : valeurs Booléennes false et true.
 - ★ 'X' : indéfini,
 - ★ 'Z' : haute impédance.
 - ★ \Rightarrow en général, pas utile en TLM !

- Vecteurs de valeurs logiques

- ▶ `sc_bv<nbbits>` : vecteurs de `sc_bit`
- ▶ `sc_lv<nbbits>` : vecteurs de `sc_logic`
- ▶ `sc_int<nbbits>`, `sc_uint<nbbits>` : entiers

- Remarque : utilisation de la généricité de C++

Sommaire de cette section

2 SystemC : Fondamentaux

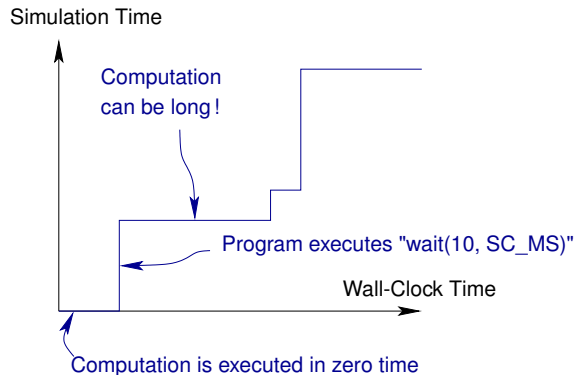
- Types de base
- **Temps simulé**
- Composants
- Connexions entre composants
- Processus

Représentation du temps

- Classe `sc_time` : couple (valeur, unité de temps)
- Unités
 - ▶ `SC_SEC` : seconde
 - ▶ `SC_MS` : milliseconde
 - ▶ `SC_US` : microseconde
 - ▶ `SC_NS` : nanoseconde
 - ▶ etc.

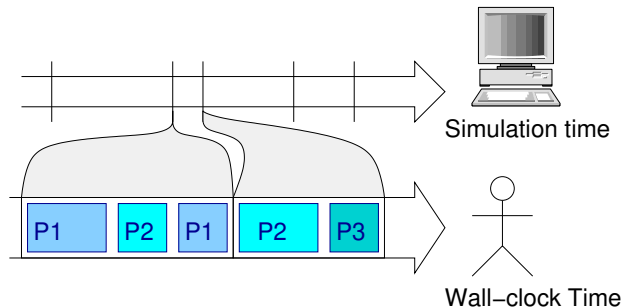
Temps simulé Vs « Wall-Clock Time »

- Temps simulé = temps que prendrait la puce pour faire la même chose
- Wall Clock Time = temps pris par la simulation.



Temps simulé Vs « Wall-Clock Time »

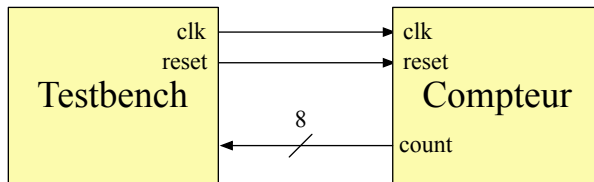
- Temps simulé = temps que prendrait la puce pour faire la même chose
- Wall Clock Time = temps pris par la simulation.



Sommaire de cette section

- 2 **SystemC : Fondamentaux**
 - Types de base
 - Temps simulé
 - **Composants**
 - Connexions entre composants
 - Processus

Exemple de ce que l'on souhaite modéliser



Code associé

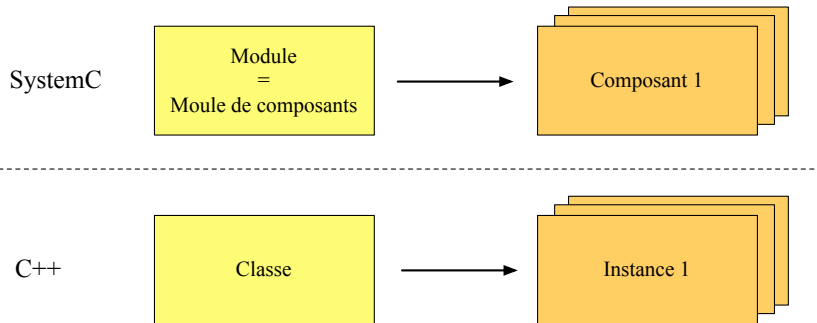
```
int sc_main(int, char**)
{
    Compteur          compteur("Compteur");
    Testbench         testbench("Testbench");
    sc_signal<bool>    sclk, sreset;
    sc_signal<sc_uint<8>> scount;

    testbench.clk.bind(sclk);
    testbench.reset.bind(sreset);
    testbench.count.bind(scount);

    compteur.clk.bind(sclk);
    compteur.reset.bind(sreset);
    compteur.count.bind(scount);

    sc_start(500, SC_NS); // penser a demarrer la simu!
    return 0;
}
```

Découpage en composants



Modules : déclaration (C++ « pur »)

```
struct Additionneur : public sc_module
{
    // attributs de la classe
    ...

    // constructeur
    ...
    Additionneur(sc_module_name nominstance);
    ...
};
```

- Classe mère commune pour tous les modules
 - ▶ Nom pour chaque composant
 - ▶ Rattachement au noyau de simulation

Modules : déclaration SystemC

- Utilisation de macros

```
SC_MODULE(Additionneur)
{
    // attributs de la classe
    ...

    // methodes de la classe
    SC_CTOR(Additionneur);
    ...
};
```

- `SC_MODULE(user_module_name)` : macro pour
`struct user_module_name : ::sc_core::sc_module`

Modules : instantiation

- Instantiation d'un module (objet C++)

```
#include <systemc>
#include "Additionneur.h"

int sc_main(int argc, char **argv)
{
    Additionneur add1("Composant1");

    ...

    return 0;
}
```

- On retrouve le nom pour chaque composant
- Autres paramètres de construction ?

Modules : implémentation

- Déclaration « manuelle » du constructeur (fichier **.h**)

```
SC_MODULE(ComposantP) {  
    // cf transparent sur les processus  
    // Les deux lignes suivantes remplacent SC_CTOR.  
    SC_HAS_PROCESS(ComposantP);  
    ComposantP(sc_module_name name, int parametre);  
    ...  
};
```

- Implémentation du constructeur (fichier **.cpp**)

```
#include "ComposantP.h"  
  
ComposantP::ComposantP(sc_module_name name,  
                       int parametre)  
    : sc_module(name) {  
    ...  
}
```

Sommaire de cette section

- 2 **SystemC : Fondamentaux**
 - Types de base
 - Temps simulé
 - Composants
 - **Connexions entre composants**
 - Processus

Connexions simples (1/2)

- Ports de base : `sc_in<type>`, `sc_out<type>`, `sc_inout<type>`
- Connexions entre ports : `sc_signal<type>`
- Exemple :

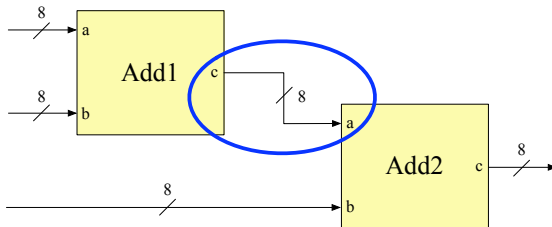
```
SC_MODULE(Add8bits)
{
    // attributs de la classe
    sc_in<sc_uint<8>> a, b; // entrees additionneur
    sc_out<sc_uint<8>> c;    // sorties additionneur
    // attention aux bons espaces entre signes ">"

    // methodes de la classe
    SC_CTOR(Add8bits);
    ...
};
```

Connexions simples (2/2)

- Exemple de connections : additionneur 3 opérandes

```
int sc_main(int argc, char **argv) {  
    Add8bits add1("Add1"), add2("Add2");  
    sc_signal<sc_uint<8>> s("s");  
  
    add1.c.bind(s); // peut etre abregé add1.c(s)  
    add2.a.bind(s);  
  
    ...  
    return 0;  
}
```



Sommaire de cette section

- 2 SystemC : Fondamentaux
 - Types de base
 - Temps simulé
 - Composants
 - Connexions entre composants
 - **Processus**

Processus

- Modélisation de circuits électroniques : besoin de concurrence
- Deux formes de parallélisme :
 - ▶ Parallélisme de description : différents **processus** à l'intérieur des composants
⇒ on simule un système parallèle.
 - ▶ Parallélisme d'implémentation : exécution sur plusieurs processeurs (pas dans le cas de SystemC !)
⇒ on simule un système **en** parallèle (ou pas).
- Noyau de simulation SystemC
 - ▶ Choix du scheduling non préemptif
 - ▶ Les processus décident quand rendre la main
- Besoin de deux ingrédients :
 - ▶ Atomicité
 - ▶ « Rendre la main »

SC_METHOD : présentation

- Processus à exécution atomique (pas de `wait`)
- Création et exécution à la suite d'un événement
- Exemples d'événements
 - ▶ Changement de valeur d'un signal
 - ▶ Fronts montants, descendants
 - ▶ Événements utilisateurs (classe `sc_event`)
- Ensemble des événements déclenchant une SC_METHOD : liste de sensibilité

SC_METHOD : exemple combinatoire (1/2)

- Exemple additionneur Add8bits (déclaration complète) :

```
SC_MODULE(Add8bits)
{
    // attributs de la classe
    sc_uint<8> a, b; // entrees additionneur
    sc_uint<8> c;    // sorties additionneur

    // methodes de la classe
    SC_CTOR(Add8bits);

    void calcul(); // point d'entree de la SC_METHOD
    // pour l'instant, c'est une methode C++ normale
};
```

SC_METHOD : exemple combinatoire (2/2)

- Exemple additionneur Add8bits (implémentation) :

```
// fichier Add8bits.cpp  
#include "Add8bits.h"
```

```
Add8bits::Add8bits(sc_module_name nom) : sc_module(nom)  
{  
    SC_METHOD(calcul);    // calcul devient une SC_METHOD  
    sensitive << a << b; // qui se "veille" quand  
                      // a ou b change.  
}
```

```
// execution de calcul a chaque changement de a ou b  
void Add8bits::calcul()  
{  
    c.write(a.read() + b.read());  
    // peut s'ecrire c = a + b;  
}
```

SC_METHOD : exemple séquentiel (1/2)

- Sensibilité sur fronts : `monport.pos()` et `monport.neg()`
- Exemple : Compteur 8 bits

```
SC_MODULE(Compteur)
{
    // attributs de la classe
    sc_in<bool>      clk;      // entree horloge
    sc_in<bool>      reset;    // remise a zero

    sc_out<sc_uint<8> > count; // valeur

    // methodes de la classe
    SC_CTOR(Compteur);

    void calcul(); // point d'entree de la SC_METHOD
};
```

SC_METHOD : exemple séquentiel (2/2)

- Exemple : Compteur 8 bits (suite)

```
Compteur::Compteur(sc_module_name nom) : sc_module(nom)
{
    SC_METHOD(calcul);
    sensitive << clk.pos();
    sensitive << reset;
}

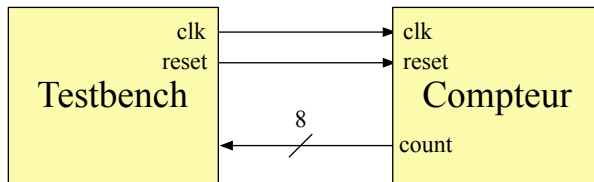
void Compteur::calcul()
{
    if (reset.read() == true)
        count.write(0);
    else if (clk.posedge())
    {
        count.write(count.read() + 1);
    }
}
```

SC_THREAD : présentation

- Processus général, non atomique
- Par défaut : lancement au démarrage de la simulation
- « Rendre la main » :
 - ▶ Attente de temps : `wait (duree)`
 - ▶ Attente sur événement : `wait (evenement)`
- Exemple : module de test

```
Testbench::Testbench(sc_module_name nom)
    : sc_module(nom)
{
    SC_THREAD(genClk);
    SC_THREAD(genReset);
}
```

Schéma du module de test



SC_THREAD : attente sur du temps (1/2)

- Exemple : module de test (génération de reset)

```
void Testbench::genReset()  
{  
    reset.write(false);  
  
    wait(2, SC_NS);  
  
    reset.write(true);  
  
    wait(5, SC_NS);  
  
    reset.write(false);  
}
```

SC_THREAD : attente sur du temps (2/2)

- Exemple : module de test (génération d'horloge)

```
void Testbench::genClk()  
{  
    clk.write(false);  
    wait(10, SC_NS);  
  
    while (true)  
    {  
        wait(3, SC_NS);  
  
        if (clk.read() == false)  
            clk.write(true);  
        else  
            clk.write(false);  
    }  
}
```


Instantiation complète

```
int sc_main(int, char**)
{
    Compteur          compteur("Compteur");
    Testbench          testbench("Testbench");
    sc_signal<bool>     sclk, sreset;
    sc_signal<sc_uint<8>> scount;

    testbench.clk(sclk);
    testbench.reset(sreset);
    testbench.count(scount);

    compteur.clk(sclk);
    compteur.reset(sreset);
    compteur.count(scount);

    sc_start(500, SC_NS); // penser a demarrer la simu!
    return 0;
}
```

SC_THREAD : attente sur événement (1/3)

- Exemple précédent en utilisant des événements
- Définition du module :

```
SC_MODULE (Testbench)
{
    sc_out<bool>          clk;
    sc_out<bool>          reset;

    sc_in<sc_uint<8> >    count;

    // implementation du constructeur inchangée
    SC_CTOR (Testbench) ;

    sc_event              reset_finished;
};
```

SC_THREAD : attente sur événement (2/3)

- Exemple précédent en utilisant des événements
- Génération du reset :

```
void Testbench::genReset()  
{  
    reset.write(false);  
  
    wait(2, SC_NS);  
  
    reset.write(true);  
  
    wait(5, SC_NS);  
  
    reset.write(false);  
    // notification de l'événement  
    reset_finished.notify();  
}
```

SC_THREAD : attente sur événement (3/3)

- Exemple précédent en utilisant des événements
- Définition du module :

```
void Testbench::genClk()  
{  
    clk.write(false);  
    wait(reset_finished); // attente d'événement  
  
    while (true)  
    {  
        wait(3, SC_NS);  
  
        if (clk.read() == false)  
            clk.write(true);  
        else  
            clk.write(false);  
    }  
}
```

SC_THREAD : variante

- Mise de l'événement en liste de sensibilité
- Exemple :

```
// constructeur
void Testbench::Testbench(sc_module_name name)
                        : sc_module(name)
{
    SC_THREAD(genClk);
    sensitive << reset_finished;
}

void Testbench::genClk()
{
    clk.write(false);
    wait(); // attente d'événement

    while (true)
    ...
}
```

Exercice

Question



Comment faire un additionner générique n bits ?

Sommaire

- 1 Présentation
- 2 SystemC : Fondamentaux
- 3 Modèle d'exécution, scheduler : simulation à évènements discrets

Parallelism in SystemC

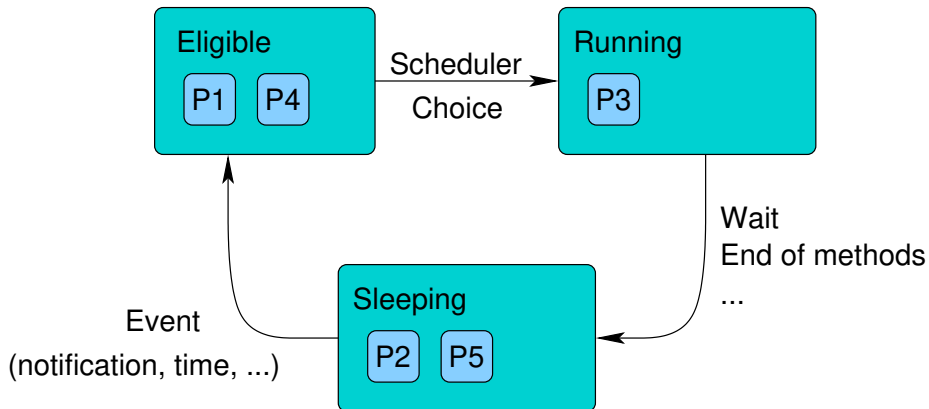
Discrete-event simulation

- One global timescale,
- SystemC contains a scheduler,
- Scheduler manages a list of processes and an event list (“agenda”)

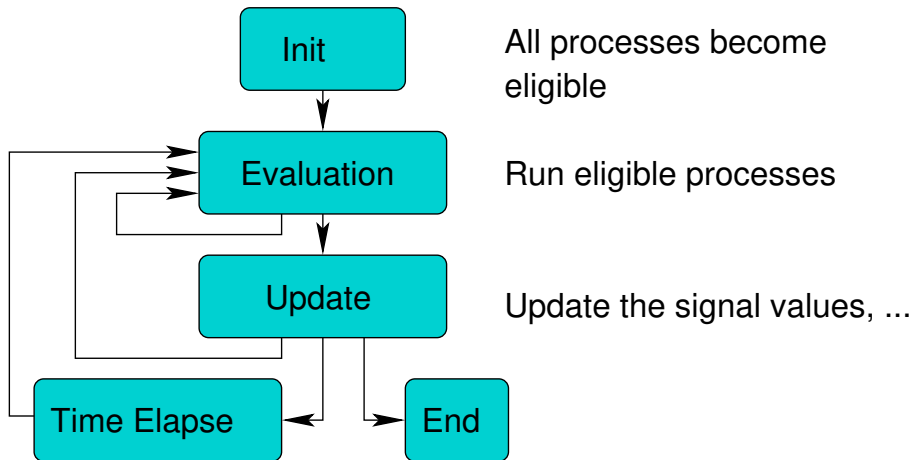
SystemC Scheduler : The Agenda

- List of “things to do later”,
- Executing process usually programs events in the future,
- When nothing more is to be done in the present, go to the next thing to do in the future.

SystemC Scheduler : List of Processes

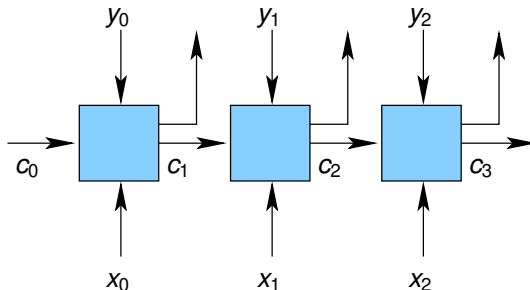


SystemC Scheduler : Scheduling Algorithm



Why an Update Phase ?

- Example : n bit adder in RTL :

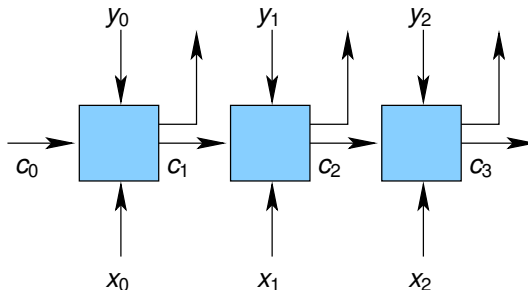


- Each cell executes :

- ▶ $o_i = x_i \text{ xor } y_i$
- ▶ $c_{i+1} = x_i \cdot y_i$

Why an Update Phase ?

- Example : n bit adder in RTL :



- Each cell executes :
 - ▶ $o_i = x_i \text{ xor } y_i$
 - ▶ $c_{i+1} = x_i \cdot y_i$
- Data-dependency !

Why an Update Phase ?

- Possible approaches :

- ▶ **Physical circuit : the carry propagates**, the last signals might oscillate briefly and stabilize.
- ▶ **Synchronous languages : static data-dependency**
 - ★ Needs more work in the compiler
 - ★ Forbids some constructs that would still have worked (`if` statements, separate compilation problem, ...)
- ▶ **SystemC/VHDL/... : δ -cycles**
 - ★ Evaluate all the processes in any order,
 - ★ Re-run the processes whose input changed until stabilization.

Δ -Cycle and Update Phase

- Most actions take effect at the end of the δ -cycle :
 - ▶ `port.write(value) ;`,
 - ▶ `event.notify(SC_ZERO_TIME) ;`,
 - ▶ `wait(SC_ZERO_TIME) ;`,
 - ▶ ...
- Order of execution within the δ -cycle *should* not matter,

Δ -Cycle and Update Phase

- Most actions take effect at the end of the δ -cycle :
 - ▶ `port.write(value) ;`,
 - ▶ `event.notify(SC_ZERO_TIME) ;`,
 - ▶ `wait(SC_ZERO_TIME) ;`,
 - ▶ ...
- Order of execution within the δ -cycle *should* not matter,

Question



what does a self-loop on a not-gate do ?

δ -cycles and TLM

- δ -cycles mostly come from the RTL world
- Can be used to model complex zero-time behavior
- Usually bad practice in TLM \Rightarrow don't rely on them

Conclusion sur cette partie

- Mécanismes de modélisation RTL
- Partie non RTL : testbench... comme en VHDL !
- Éléments de base aussi utilisés par la suite
- Synthétisabilité
 - ▶ SystemC Synthesizable Subset (Première version officielle : 1.4, Mars 2016)
(e.g. `SC_METHOD` sans allocation de pointeurs)
 - ▶ Utilisation des types appropriés (bool, sc_logic...)
 - ▶ Quelques outils commerciaux :
 - ★ CoCentric SystemC Compiler (Synopsys) (abandonné, puis ressuscité)
 - ★ Nepsys (Prosilog)
 - ★ Cynthesizer (Forte Design Systems)
 - ★ PICO (code C)
 - ▶ Alternative : Synthèse du C pur et emballage dans SystemC pour simulation.
 - ▶ Utilité ?