

# Modélisation Transactionnelle des Systèmes sur Puce avec SystemC

## Ensimag 3A — filière SEOC

### Grenoble-INP

#### Notions Avancé en SystemC/TLM

Frédéric Pétrot

[frederic.petrot@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:frederic.petrot@univ-grenoble-alpes.fr)

2021-2022



# Planning des séances

- 01/12/21 (FP) CM1 Introduction : systèmes sur puce et modélisation au niveau transactionnel
- 08/12/21 (FP) CM2 Introduction au C++ et présentation de SystemC
- 08/12/21 (FP) CM3 Communications haut-niveau et modélisation TLM en SystemC
- 15/12/21 (FP) CM4 Intervenant extérieur : Jérôme Cornet (STMicroelectronics)
- 15/12/21 (FP) TP1 (1/1): Plateforme matérielle SystemC/TLM
- 06/01/22 (FP) CM5 Utilisations des plateformes TLM
- 06/01/22 (FP) CM6 Notions Avancées en SystemC/TLM
- 12/01/22 (FP) TP2 (1/2) : Intégration du logiciel embarqué
- 12/01/22 (FP) TP2 (2/2) : Intégration du logiciel embarqué
- 19/01/22 (OM) CM7 Synthèse d'architecture
- 19/01/22 (OM) TP3 (1/2) : Synthèse de haut niveau et génération de circuits numériques
- 21/01/22 (OM) TP4 (2/2) : Synthèse de haut niveau et génération de circuits numériques

# Sommaire

- 1 Bug, or not Bug?
- 2 Optimisations de Performances
- 3 Questions de Sémantique
- 4 Power and Temperature Estimation

# Sommaire

- 1 Bug, or not Bug?
- 2 Optimisations de Performances
- 3 Questions de Sémantique
- 4 Power and Temperature Estimation

# What is a bug?

- 1 Launch a SystemC/TLM simulation
- 2 It produces incorrect result

## Question



Good news or bad news?

# A Few Kinds of Model/Simulator's Bugs

- Hardware bug:
  - ① Simulator design bug, corresponding to a real hardware bug
  - ② Simulator programming error, irrelevant in real hardware
- Software bug: software doesn't run properly on simulator
  - ① Because software is buggy?
  - ② Because simulator is not faithful?

# A Few Kinds of Model/Simulator's Bugs

- Hardware bug:
  - ① Simulator design bug, corresponding to a real hardware bug 😊
  - ② Simulator programming error, irrelevant in real hardware 😞
- Software bug: software doesn't run properly on simulator
  - ① Because software is buggy? 😊
  - ② Because simulator is not faithful? 😞

## Model/Simulator's Bugs

Model only.  
Will be thrown away  
in final product

- Hardware bug
  - 1 Simulator design bug, corresponding to a real hardware bug 😊
  - 2 Simulator programming error, irrelevant in real hardware 😞
- Software bug: software doesn't run properly on simulator
  - 1 Because software is buggy? 😊
  - 2 Because simulator is not faithful? 😞

Actual Software.  
Will be embedded  
in final product



## What Can we Expect from the Model?

Software **runs** on TLM  $\Rightarrow$  Software **runs** on real chip

## What Can we Expect from the Model?

Software **runs** on TLM  $\Rightarrow$  Software **runs** on real chip



Software **doesn't run** on real chip

$\Rightarrow$  Software **doesn't run** on TLM

# Another Kind of “Bug”

- Up to now:
  - ▶ Hardware Model doesn't work
  - ▶ Software doesn't run on hardware model
- What about:
  - ▶ Software **does** run on hardware model, but **not** on real chip

## Another Kind of “Bug”

- Up to now:
  - ▶ Hardware Model doesn't work
  - ▶ Software doesn't run on hardware model
- What about:
  - ▶ Software **does** run on hardware model, but **not** on real chip

Hiding bugs  $\neq$  Fixing bugs

# Sets of Behaviors, Faithfulness

- An ideal TLM model ...
  - ▶ Should exhibit **all** behaviors of the real system
  - ▶ May exhibit **more** behaviors than the real system
  - ▶ Should not exhibit “**too many**” unrealistic behaviors

# (Counter) Examples

TLM should exhibit **all** behaviors of the real system (1/2)

## Software CPU1

```
compute_img(&buf);  
img_computed = 1;
```

## Software CPU2

```
while (img_computed != 1)  
    continue;  
read_img(&buf);
```

## Question



Are all interleavings correct?

# (Counter) Examples

TLM should exhibit **all** behaviors of the real system (2/2)

## (Incorrect) Software CPU1

```
img_computed = 1;  
compute_img(&buf);
```

## Software CPU2

```
while (img_computed != 1)  
    continue;  
read_img(&buf);
```

## Question



Are all interleavings correct?

# (Counter) Examples

TLM should exhibit **all** behaviors of the real system (2/2)

## (Incorrect) Software CPU1

```
img_computed = 1;  
compute_img(&buf);
```

## Software CPU2

```
while (img_computed != 1)  
    continue;  
read_img(&buf);
```

## Question



Are all interleavings correct?

## Question



Will we see the bug in a simulation?



# (Counter) Examples

TLM may exhibit **more** behaviors than the real system

## Software CPU1

```
compute_img(&buf);  
img_computed = 1;
```

## Software CPU2

```
count=0;  
while (img_computed != 1)  
    count++;  
assert(count == 3);  
read_img(&buf);
```

# (Counter) Examples

TLM should not exhibit “too many” unrealistic behaviors

## Software CPU1

```
dest = stg_fast();
```

## Software CPU2

```
stg_very_slow();  
do_stg_with(dest);
```

- No explicit synchronization between `dest = ...` and access to `dest ...`
- ... but do we want to see this bug?

# Set of Behaviors and Non-Determinism

- TLM models should exhibit **several** behaviors
- Several possibilities  $\Rightarrow$  non-determinism
- Implementing non-determinism:
  - ▶ Formal verification approach: exhaustive exploration
  - ▶ Simulation approach: random

## An Example of Non-Determinism: Loose Timing

```
// generates a pseudo-random float
// between 0.0 and 0.999...
float randfloat()
{
    return rand() / (float(RAND_MAX)+1);
}

// loose timing
void pv_wait (x) {
    wait(x*(randfloat()+0.5));
}
```

### Question



What does it do?

# Sommaire

- 1 Bug, or not Bug?
- 2 **Optimisations de Performances**
- 3 Questions de Sémantique
- 4 Power and Temperature Estimation

# Sommaire de cette section

## 2 Optimisations de Performances

- Transaction bloc
- Timing « approximé » et temporal decoupling
- Parallélisation de SystemC

# Transaction bloc

## Avant

```
for (ensitlm::addr_t ad = ad0;  
    ad < ad0+size; ad++) {  
    write(socket, ad,  
          data[ad]);  
}
```

- Grosse granularité
- Beaucoup plus rapide en simulation

## Après

```
// 1 echange atomique  
block_write(socket, ad, data, size);
```

# Transaction bloc

## Avant

```
for (ensitlm::addr_t ad = ad0;  
    ad < ad0+size; ad++) {  
    write(socket, ad,  
          data[ad]);  
}
```

- Grosse granularité
- Beaucoup plus rapide en simulation

## Après

```
// 1 echange atomique  
block_write(socket, ad, data, size);
```

## Question



Perd-t-on en fidélité ?



# Sommaire de cette section

## 2 Optimisations de Performances

- Transaction bloc
- Timing « approximé » et temporal decoupling
- Parallélisation de SystemC

# Timing approximé et découplage temporel

- Constat : les changements de contexte des *threads* sont lents<sup>1</sup>
- Conséquence 1 : `wait` coûte cher !
- Conséquence 2 : on évite de mettre des `wait`.

---

1. Malgré l'utilisation des quick threads ou des pthreads

# Timing approximé et découplage temporel

- **Problème :**

- ▶ En PVT, granularité de temps fine.
- ▶  $\Rightarrow$  1 `wait` pour chaque avancement du temps.
- ▶  $\Rightarrow$  simulation lente.

# Timing approximé et découplage temporel

- Problème :

- ▶ En PVT, granularité de temps fine.
- ▶  $\Rightarrow 1 \text{ wait}$  pour chaque avancement du temps.
- ▶  $\Rightarrow$  simulation lente.

- Solution proposée en TLM 2:

- ▶ Chaque processus peut être « en avance » sur le temps global.
- ▶ (L'avance correspond à l'argument `sc_time` des méthodes `transport` de TLM-2, ignoré dans ENSITLM)
- ▶ Quand faire les `wait()` (i.e. laisser le reste de la plate-forme rattraper notre avance) ?
  - ★ **Quantum Keeping**: Si on est plus « en avance » que le quantum (constante de temps choisie par l'utilisateur)
  - ★ **Synchronisation explicite**: Avant (ou après ?) les points de synchronisation

# Timing approximé et découplage temporel

## Exemple

```
sc_time t = SC_ZERO_TIME; // local advance over SystemC time
local_computation(); // Instantaneous wrt SystemC
t += sc_time(12, SC_NS); // don't wait() now
other_computation();
t += sc_time(3, SC_NS);
socket.write(addr, data, t); // may update t
wait(t); t = SC_ZERO_TIME; // Catch-up with SystemC time
send_interrupt();
```

# Timing approximé et découplage temporel

## Exemple

```
sc_time t = SC_ZERO_TIME; // local advance over SystemC time  
local_computation(); // Instantaneous wrt SystemC  
t += sc_time(12, SC_NS); // don't wait() now  
other_computation();  
t += sc_time(3, SC_NS);  
socket.write(addr, data, t); // may update t  
wait(t); t = SC_ZERO_TIME; // Catch-up with SystemC time  
send_interrupt();
```

## Question



Quels sont les problèmes ?

# Sommaire de cette section

## 2 Optimisations de Performances

- Transaction bloc
- Timing « approximé » et temporal decoupling
- Parallélisation de SystemC

# Parallélisation de SystemC

- Paradoxe:

- ▶ Les systèmes sur puces sont parallèles
- ▶ SystemC a une notion de processus
- ▶ SystemC n'exploite qu'un processeur !



# Parallélisation de SystemC

- Paradoxe:

- ▶ Les systèmes sur puces sont parallèles
- ▶ SystemC a une notion de processus
- ▶ SystemC n'exploite qu'un processeur !

- Solution (très) naïve:

- ▶ 1 SC\_THREAD → 1 pthread
- ▶ On lance tout en parallèle
  - ⇒ beaucoup de pthreads, avec beaucoup de synchronisations
  - ⇒ ne passe pas à l'échelle

## Parallélisation de SystemC

- Paradoxe:
  - ▶ Les systèmes sur puces sont parallèles
  - ▶ SystemC a une notion de processus
  - ▶ SystemC n'exploite qu'un processeur !
- Solution (très) naïve:
  - ▶ 1 SC\_THREAD  $\rightarrow$  1 pthread
  - ▶ On lance tout en parallèle
    - $\Rightarrow$  beaucoup de pthreads, avec beaucoup de synchronisations
    - $\Rightarrow$  ne passe pas à l'échelle
- Solution moins naïve:
  - ▶  $N$  processeurs  $\rightarrow \approx N$  pthreads.
  - ▶ Gestion du mapping « processus SystemC »  $\leftrightarrow$  pthread dans le kernel SystemC.

## Parallélisation de SystemC

- Paradoxe:
  - ▶ Les systèmes sur puces sont parallèles
  - ▶ SystemC a une notion de processus
  - ▶ SystemC n'exploite qu'un processeur !
- Solution (très) naïve:
  - ▶ 1 SC\_THREAD  $\rightarrow$  1 pthread
  - ▶ On lance tout en parallèle
    - $\Rightarrow$  beaucoup de pthreads, avec beaucoup de synchronisations
    - $\Rightarrow$  ne passe pas à l'échelle
- Solution moins naïve:
  - ▶  $N$  processeurs  $\rightarrow \approx N$  pthreads.
  - ▶ Gestion du mapping « processus SystemC »  $\leftrightarrow$  pthread dans le kernel SystemC.

### Question



Où est le problème ?

# Parallélisation de SystemC

- Si on veut faire les choses proprement:
  - ▶ Analyse statique des dépendances de données
  - ▶ Prise en compte à l'exécution
  - ▶  $\Rightarrow$  on sort du principe « SystemC, c'est facile à compiler, g++ le fait très bien ».
- Problème restant:
  - ▶ Parallélisation « à l'intérieur du  $\delta$ -cycle », mais exécuter en parallèle des processus censés s'exécuter à différents instants de simu = difficile.
- Solutions envisageables:
  - ▶ Profiter du découplage temporel pour paralléliser
  - ▶ Tâches avec durée (cf. `sc_during`)

## Parallélisation de SystemC : conclusion

- C'est dur.  
PDES (*Parallel Discrete Event Simulation*)  
théorie établie entre 1979 (Chandy-Misra, Lamport) et 1990 (Fujimoto)  
implantations peu efficaces pour nos problèmes
- La plupart des gens qui le font ne se soucient pas de préservation de la sémantique
- Solution en pratique : lancer  $N$  simulations sur  $N$  machines !
- Il faut peut-être un autre langage ?

# Accélération des simulations SystemC

- Code interne aux composants = C++  
⇒ g++ -O3 et le tour est joué (ou pas)
- Changement de contexte = cher :
  - ▶ Ordonnancement
  - ▶ Sauvegarde/restauration de tous les registres
  - ▶ Changement du pointeur de pile ⇒ cache-miss
  - ▶ Changement du compteur programme ⇒ vidage de pipeline
  - ▶ sans compter les flushs de TLB, etc, suivant la manière dont les threads sont implantés
- Transactions = cher :
  - ▶ Plusieurs appels de méthodes virtuelles (⇒ non inline-ables)
  - ▶ Décodage d'adresse pour router la transaction (en  $O(\text{nb slave})$ )
  - ▶ ⇒ Là où la vraie plateforme fait un `load/store`, le code TLM exécute du code difficile à optimiser.

# Accélération des simulations SystemC

## Minimiser le coût dû au changement de contexte

- Utilisation de `SC_METHOD` à la place des `SC_THREAD` (pas toujours possible)
- Minimisation du nombre de `wait` à exécuter
- Ordonnancement statique (<http://www.cprover.org/scoot/>: plus de travail à la compilation, simulation 2 à 6 fois plus rapide sur des exemples)

# Accélération des simulations SystemC

## Minimiser le coût du aux transactions

- DMI = Direct Memory Interface: on récupère un pointeur sur la zone mémoire intéressante, et on fait des accès sans passer par le bus.



# Accélération des simulations SystemC

## Minimiser le coût du aux transactions

- DMI = Direct Memory Interface: on récupère un pointeur sur la zone mémoire intéressante, et on fait des accès sans passer par le bus.

### Question



Quel est le problème ?

# Accélération des simulations SystemC

## Minimiser le coût du aux transactions

- DMI = Direct Memory Interface: on récupère un pointeur sur la zone mémoire intéressante, et on fait des accès sans passer par le bus.

### Question



Quel est le problème ?

- Quasi-static scheduling : lancer une passe d'optimisations après l'élaboration qui ordonne les threads selon leurs dépendances

# Sommaire

- 1 Bug, or not Bug?
- 2 Optimisations de Performances
- 3 Questions de Sémantique
- 4 Power and Temperature Estimation

# Sommaire de cette section

- 3 Questions de Sémantique
  - Comparaison TLM/RTL
  - Verification Formelle

## Question



Quel est le problème ?

# Sommaire de cette section

- 3 Questions de Sémantique
  - Comparaison TLM/RTL
  - **Vérification Formelle**

# Vérification Formelle de SystemC

- Plusieurs approches :

- ▶ Compilation de SystemC vers des langages sources des outils de preuve
  - ★ Front-end SystemC dédié
  - ★ Modélisation formelle de toutes les constructions SystemC
- ▶ Exploration exhaustive de l'espace d'états à l'exécution
  - ★ stateless: on explore tous les ordonnancements de taille  $< N$
  - ★ statefull: on ajoute la possibilité de mémoriser et de comparer des états  
( $\Rightarrow$  construction de l'espace d'états entier)
- ▶ En général, problème de passage à l'échelle (scalability)  
produits d'automates  $\Rightarrow$  explosion de l'espace d'états (state explosion)

# Sommaire

- 1 Bug, or not Bug?
- 2 Optimisations de Performances
- 3 Questions de Sémantique
- 4 Power and Temperature Estimation



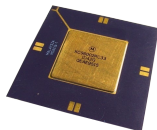
# Power and Temperature Estimation

## Question



How?

# Power estimation in TLM: Power-state Model

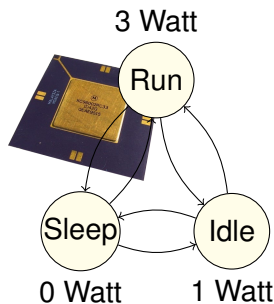


```
// SystemC thread
void compute() {
    while (true) {

        f();
        wait(10, SC_MS);

        wait(irq);
    }
}
```

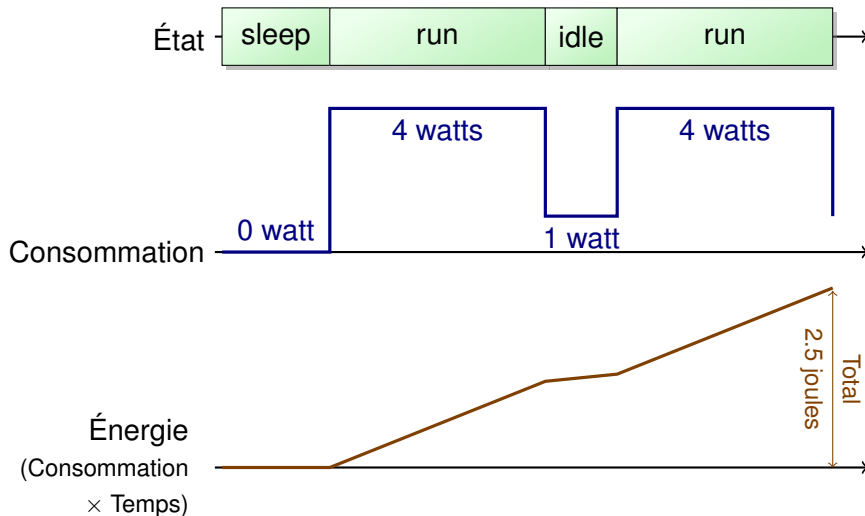
# Power estimation in TLM: Power-state Model



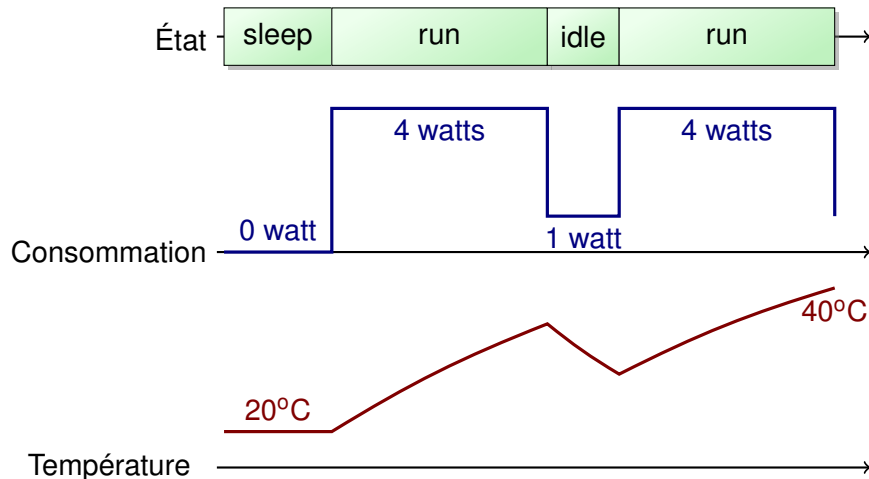
```
// SystemC thread
void compute() {
    while (true) {
        set_state("run");
        f();
        wait(10, SC_MS);
        set_state("idle");
        wait(irq);
    }
}
```

- Consumption depends on:
  - ▶ Activity state (switching activity inside component)
  - ▶ Electrical state (voltage, frequency)
  - ▶ **Traffic** (stimulation by other components)

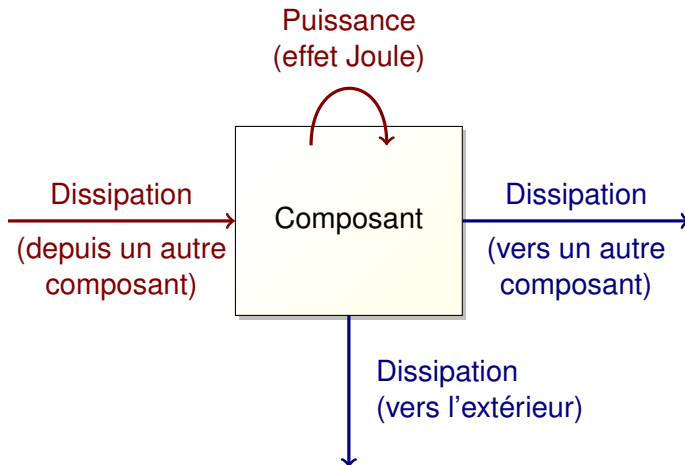
## Des états à la consommation



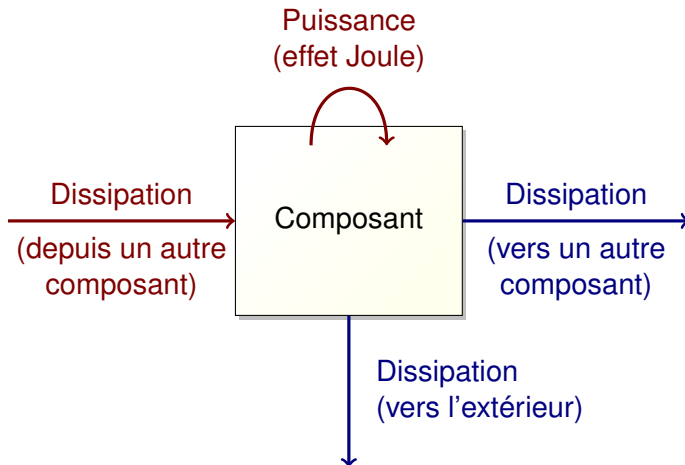
## De la consommation à la température



# Puissance consommée, température, et dissipation de chaleur

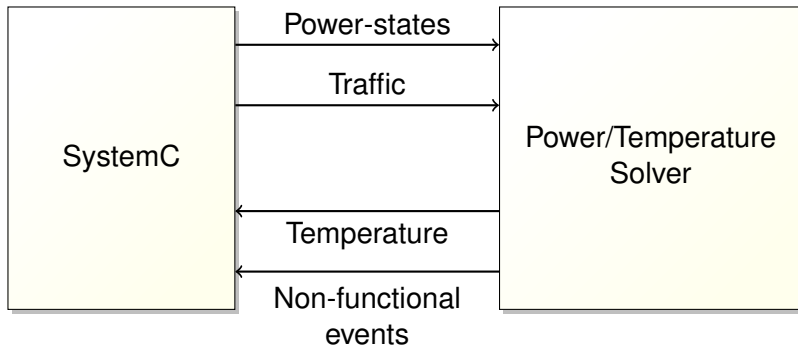


# Puissance consommée, température, et dissipation de chaleur



~> système d'équation différentielles, résolus par des solveurs dédiés

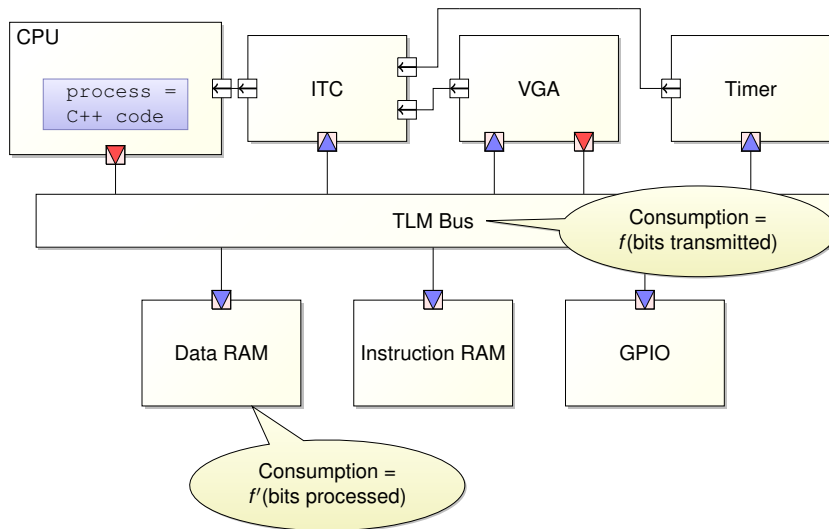
# SystemC and Temperature Solver Cosimulation



Functionality can depend on non-functional data  
(e.g. validate power-management policy)



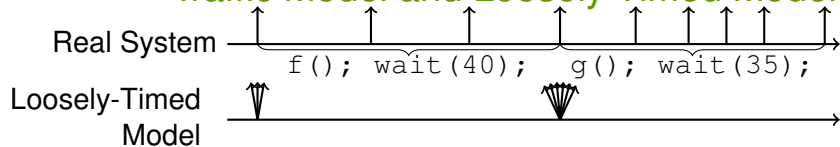
## Traffic Models



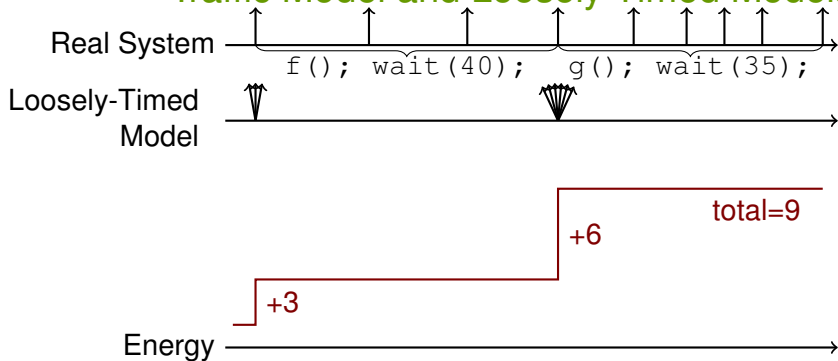
# Traffic Model and Loosely Timed Models



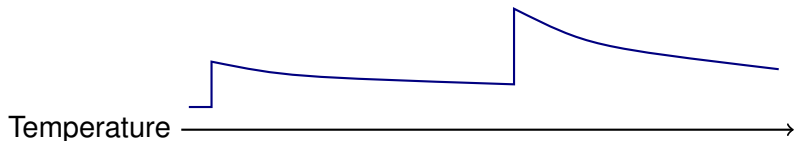
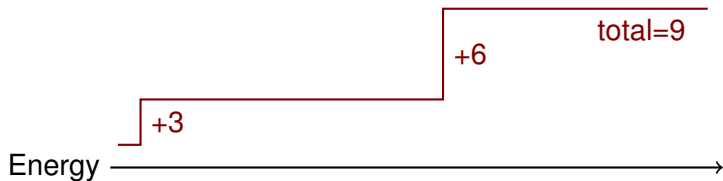
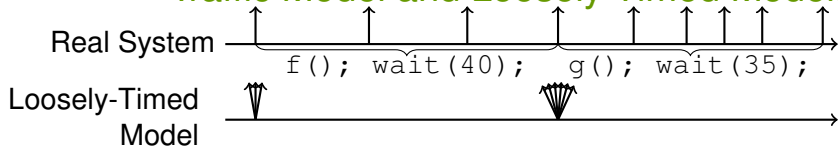
## Traffic Model and Loosely Timed Models



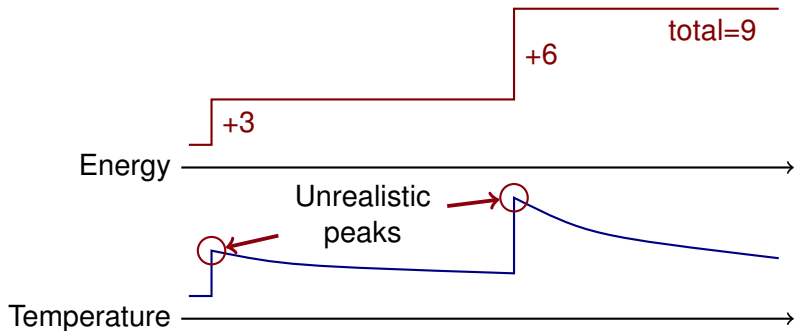
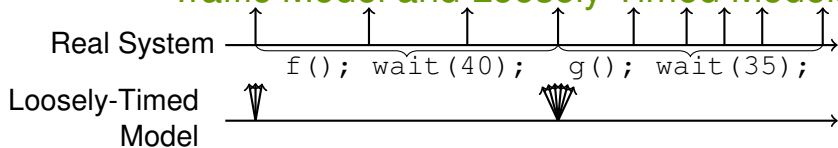
# Traffic Model and Loosely Timed Models



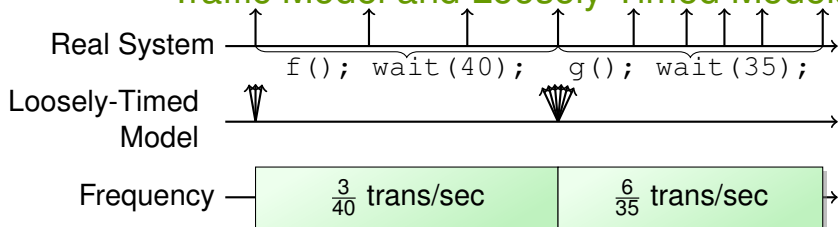
# Traffic Model and Loosely Timed Models



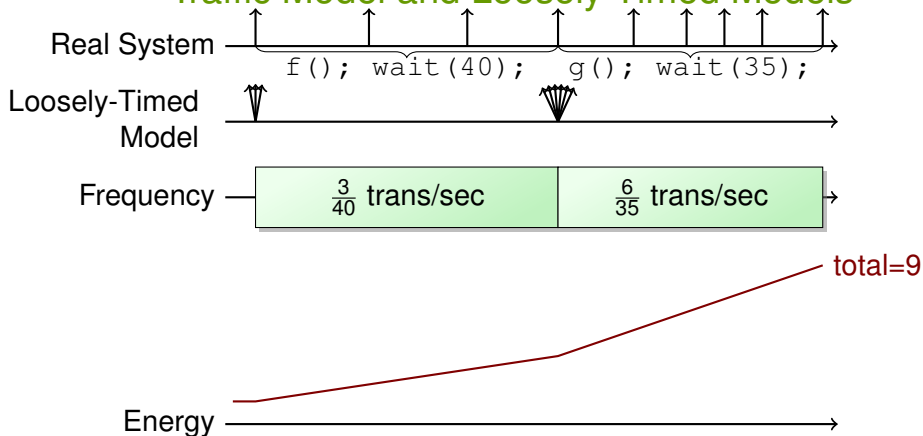
## Traffic Model and Loosely Timed Models



# Traffic Model and Loosely Timed Models



## Traffic Model and Loosely Timed Models





## Traffic Model and Loosely Timed Models

