Une approche synchrone à la conception de systèmes embarqués temps réel

Dumitru Potop-Butucaru

dumitru.potop@inria.fr

cours EPITA, 2024

Contenu

- Introduction au « temps réel », 2ème partie
- Spécification fonctionnelle synchrone en Heptagon
  - Notions fondamentales
    - Temps logique
    - Horloge logique
  - Exécution conditionnelle
- Préparation du TP

Système de **contrôle embarqué**

- Caractéristiques communes:
  - Systèmes réactifs.
    - Execution *a priori* infinie
  - **Exigences non-fonctionnelles**, y compris **temps-réel**
  - Spécification/implantation/V&V compliquées au sens théorique (complexité algorithmique) et au sens de l'ingénierie
    - Spécification: Plusieurs langages/formalismes generalistes (C, Ada,UML) ou dédiés (DSL=Domain Specific Language, comme Simulink, SCADE, AUTOSAR, AADL, SysML, etc.). Utilisation intensive de techniques d'analyse de programmes (vérif. formelle, simulation, etc.)
    - Implantation: Matériel spécifique (contrôleurs contraints en mémoire et vitesse, bus spécifiques, etc.), contraintes de consommation, etc.
  - Les erreurs sont coûteuses (soit en vies humaines, soit en argent).
    - Déterminisme fonctionnel et temporel fortement souhaité.
- Conséquences: Besoins communs dans le processus de développement

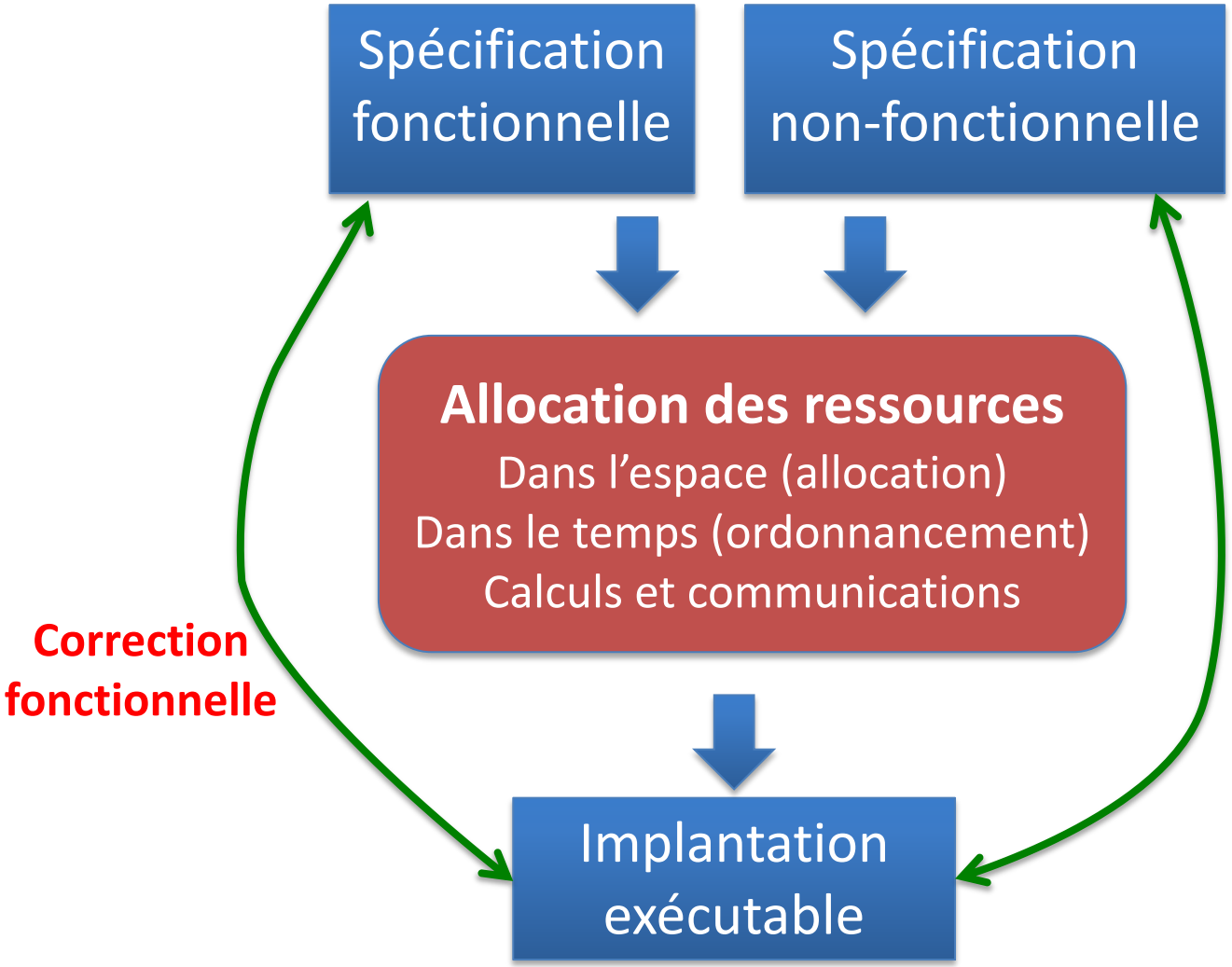
Système de **contrôle embarqué**

- Exigences non-fonctionnelles complexes au niveau système :
  - Temps réel
    - Efficacité
    - Prédictibilité
  - Basse consommation
    - Green computing
  - Sécurité (accidents) et Sûreté (actes malveillants)
    - Tolérance aux pannes
    - Isolation des applications
  - Coût (argent/temps/…)
    - Plate-forme/développement/exploitation
  - Flexibilité
    - Evolution du système
  - Taille
  - Dissipation thermique
  - …





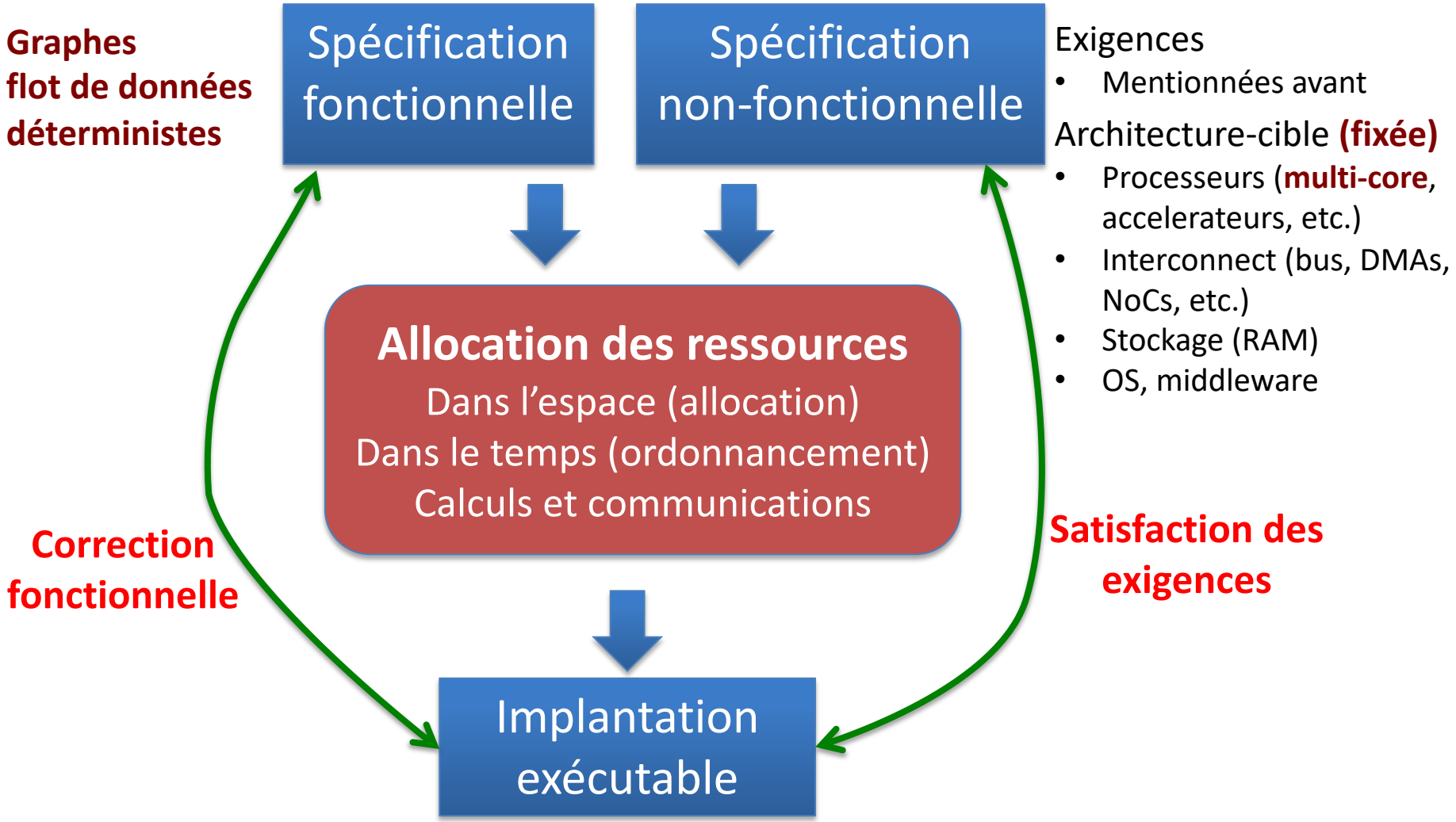
Implantation des systèmes embarqués



Exigences
- Mentionnées avant

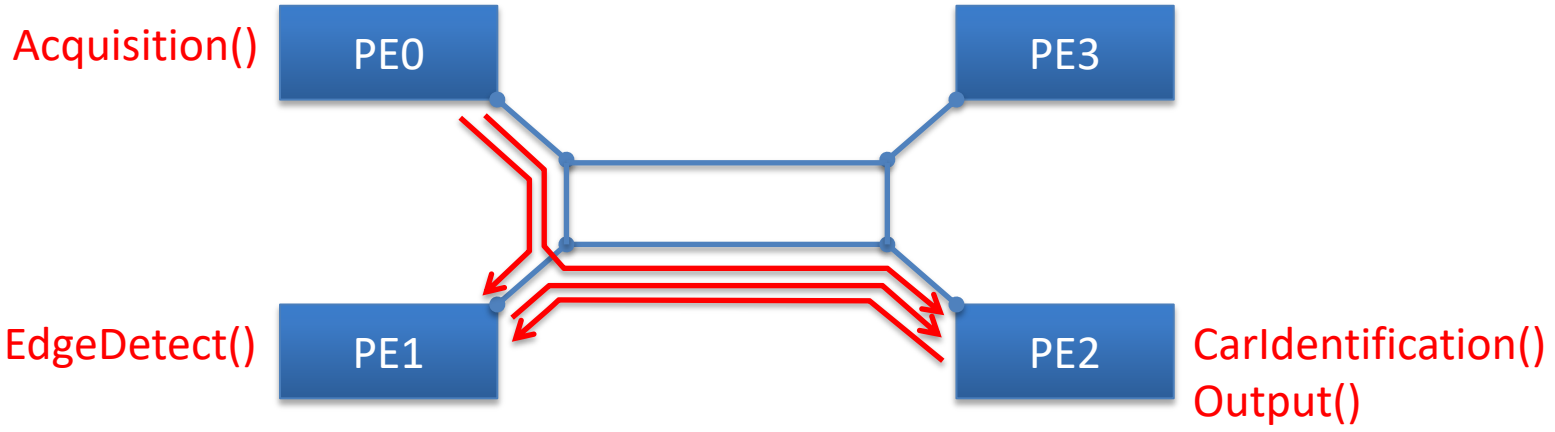
Architecture-cible
- Processeurs (CPUs, accelerateurs, etc.)
- Interconnect (bus, DMAs, NoCs, etc.)
- Stockage (RAM)
- OS, middleware

Implantation des systèmes embarqués



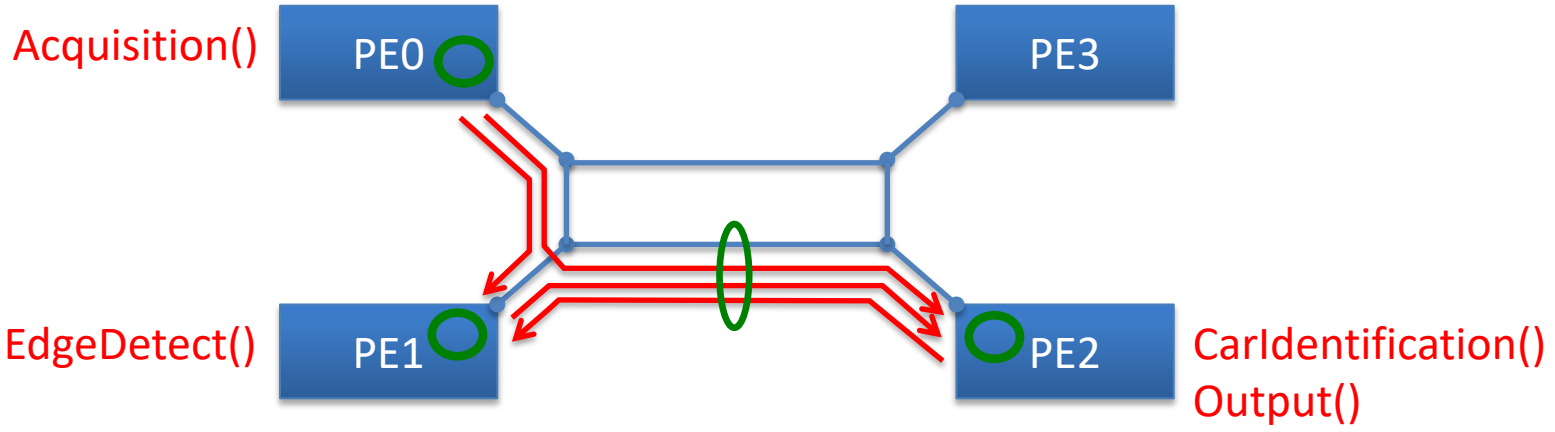
Implantation des systèmes embarqués

- Allocation des ressources dans l'espace
  - Où (par qui) l'opération est réalisée ?
  - Vocabulaire :
    - CPU/RAM: **allocation, distribution**
    - Interconnect: **routage**



Implantation des systèmes embarqués

- Allocation des ressources dans le temps
  - Quand l'opération est réalisée (à quelle date, dans quel ordre)
    - Opération indispensable dans tout système concurrent
  - Vocabulaire:
    - CPU: **ordonnancement, scheduling, sequençage**
    - Interconnect: **arbitration, ordonnancement, sequençage**

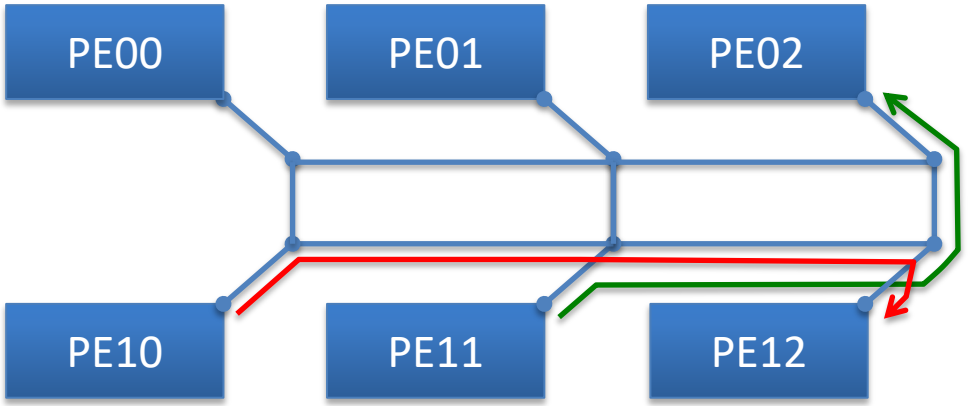


Implantation des systèmes embarqués

- Complexité des algorithmes d'allocation des ressources
  - Optimal: NP-hard dans les meilleurs cas, impossible en pratique
  - Heuristiques (techniques fondées sur l'expérience)
    - Parmi elles : les politiques classiques d'ordonnancement (RM, EDF, etc.)
    - Une heuristique peut être optimale ou formellement caractérisée sous certaines hypothèses restrictives (e.g. EDF optimal en mono-processeur avec coût de préemption négligé)
- Classification des techniques. Critère 1 (déjà introduit):
  - Hors ligne/Statique
    - Décisions prises avant l'exécution
      - L'exécution conditionnelle peut être prise en compte plus facilement
    - Aucune imprécision temps/ordre dans un certain référentiel (après abstraction)
  - En ligne/Dynamique
    - Il reste de l'imprécision en temps/ordre.
    - Les décisions dépendent d'aspects du système qui n'ont pas été spécifiés ou analysés hors ligne (trop complexe), ou l'ordonnancement statique est inapplicable (tables trop grandes) :
      - Dates d'arrivée des événements
      - Variations du temps d'exécution
      - Aspects internes/inobservables de l'OS/HW/etc.

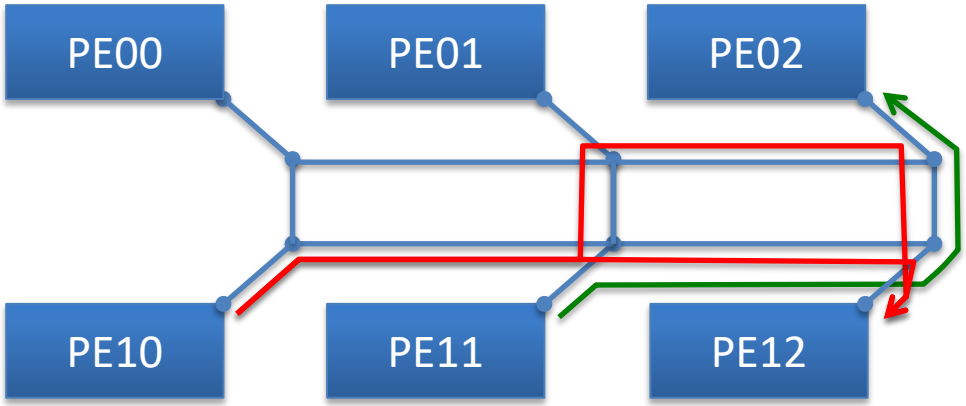
Implantation des systèmes embarqués

- Exemple: routage sur un réseau sur puce :
  - Problème: transmettre 2 données
  - Routage statique (X-first):



Implantation des systèmes embarqués

- Exemple: routage sur un réseau sur puce :
  - Problème: transmettre 2 données
  - Routage dynamique (adaptatif) :



Implantation des systèmes embarqués

- Exemple: ordonnancement sur un CPU :
  - Problème: exécuter cycliquement f() et g()
  - Ordonnancement dynamique :

Process1:
```
for(;;){
        f();
}
```

Process2:
```
for(;;){
        g();
}
```

Lancer les processus sous Linux (ou Arinc 653 avec certains paramètres)

  - Ordonnancement statique :

```
for(;;){
        f();
        g();
}
```

Contraintes :
- Périodes égales
- Dépendances à respecter

Ordonnancement/arbitration (classification)

- Critère 2 : complexité de l'algorithme (politique) d'ordonnancement
  - Plus simple: Ordre fixe, FIFO
  - Politiques équitables
    - (weighted) round robin
    - (weighted) fair queuing, etc.
  - À base de priorités
    - Priorités statiques : FP, RM, DM
    - Priorités dynamiques : EDF, LLF
    - …
  - Algorithmes hors ligne (heuristiques ou « exacts »)
    - Décisions prises hors ligne sont appliquées en ligne

Applicables en ligne (basse complexité)

- Autres critères :
  - Event-driven vs. Time-triggered (comment on déclenche l'exécution ?)
  - Preemptif vs. Non-preemptif (peut-on interrompre une opération ?)
  - Criticalité simple vs. Criticalité mixte (importance d'une tâche ?)
  - Tolérant aux pannes ou non ?
  - Ordonnancement partitionné vs. global, etc.

Ordonnancement multiprocesseur

- **Mapping du système =**
  Mappings sur CPUs + mapping sur l'interconnect
  - Les points limitants peuvent être dans les CPU, l'interconnect, ou une combinaison des deux
    - Dépend du matériel, de l'application, et du mapping lui-même
    - computation-intensive vs. communication-intensive
      - E.g. machine learning: les deux à la fois
  - Divers algorithmes sont nécessaires dans differents contextes embarqués (sur CPU et interconnect)
    - L'ordonnancement FIFO est simple/peu cher
    - Les algorithmes équitables sont utilisés en temps réel mou (e.g. traitement de signal), et certains permettent l'analyse modulaire.
    - L'ordonnancement à base de priorités est utile pour assurer des temps de réponse courts pour quelques tâches importantes
    - L'ordonnancement hors ligne est utile pour les traitements périodiques (contrôle discrétisé) and pour assurer une meilleure prédictibilité dans les systèmes critiques …

Flot de données synchrone

2ème partie

Avantages du synchrone flot de données

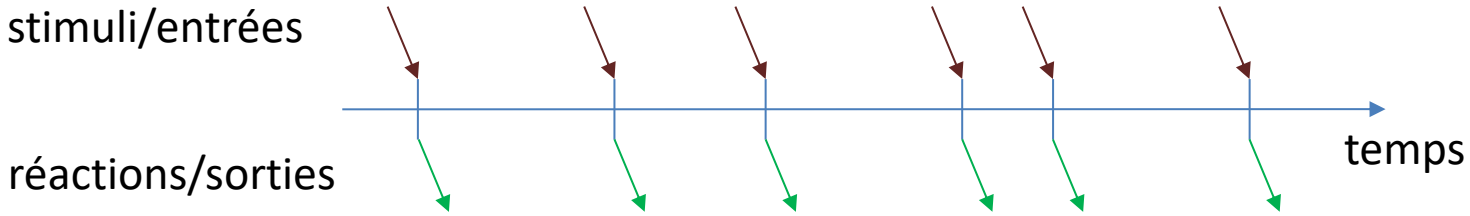
- Proche de **Simulink, VHDL/Verilog, Tensorflow/Jax/Pytorch**…
  - Standards de facto
- **Correction par construction**
  - Sans effets de bord
  - Sans variables non-initialisées
  - Concurrence déterministe
  - Sans comportements infinis (sauf au niveau système)
- Test/analyse/debug/preuve/**certification** facilités
  - Déterminisme fonctionnel – un seul comportement pour un jeu de données d'entrée, même en présence de multi-tâches/distribution
  - Modèle synchrone = moins d'états à explorer
- **Synthèse** d'implantations facilitée
  - Proche des modèles de tâches du temps réel
  - Ordonnancement, génération de code

Que peut-on programmer avec ?

- Tout ce que l'on peut programmer en C **sans appels de fonctions récursives**.
  - Une fonction ne peut pas s'appeler soi-même, directement ou indirectement
  - Si on n'utilise pas des types infinis, même expressivité que les :
    - automates finis
    - circuits digitaux synchrones
  - Moins expressif que les fonctions récursives
    - Machine de Turing (à bande infinie)

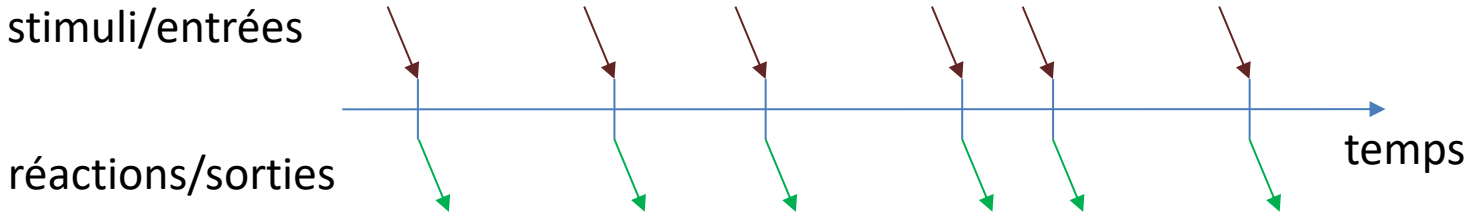
Temps logique discret

- Système réactif = réagit aux stimuli venant de l'environnement
  - Hypothèse supplémentaire – interaction en temps discret
    - Les stimuli sont pris en compte en une séquence de cycles d'exécution
    - L'acquisition d'entrées et la production de réactions se font seulement aux frontières entre cycles (les calculs sont atomiques)
      - Facilite la définition d'une sémantique concurrente et déterministe

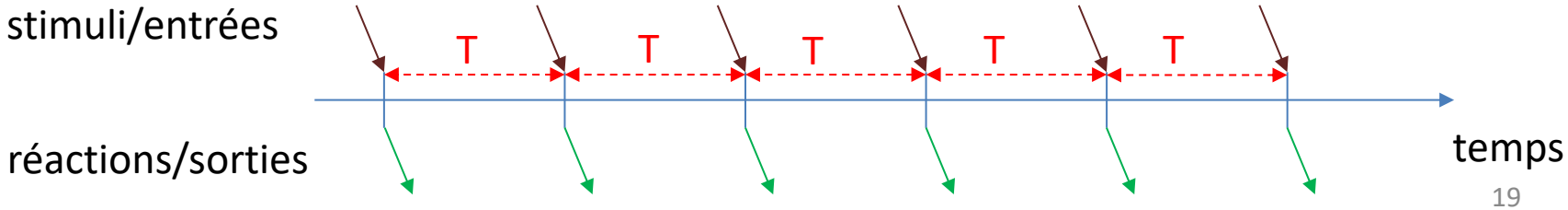


Temps logique discret

- Système réactif = réagit aux stimuli venant de l'environnement
  - Hypothèse supplémentaire – interaction en temps discret
    - Les stimuli sont pris en compte en une séquence de cycles d'exécution
    - L'acquisition d'entrées et la production de réactions se font seulement aux frontières entre cycles (atomicité : entrées constantes pendant un cycle)
      - Facilite la définition d'une sémantique concurrente et déterministe

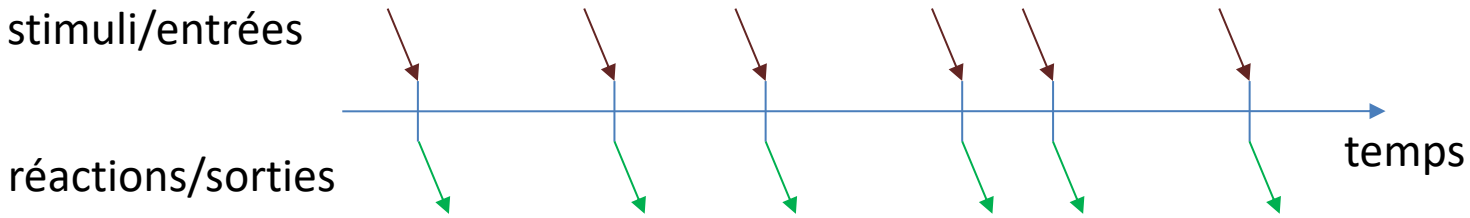


  - Facile à lier au temps réel "physique" classique (e.g. périodique)

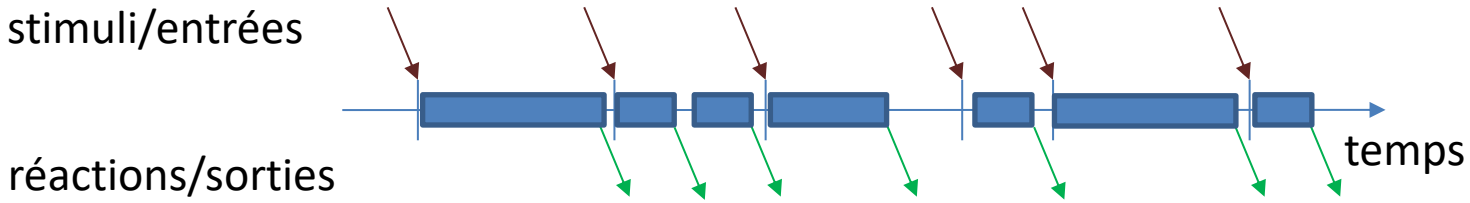


Temps logique synchrone

- Synchrone = paradigme en temps logique
  - Modèle formel – calculs instantanés
    - Sorties et entrées sont synchrones -> définition formelle naturelle de la composition (produit synchrone)

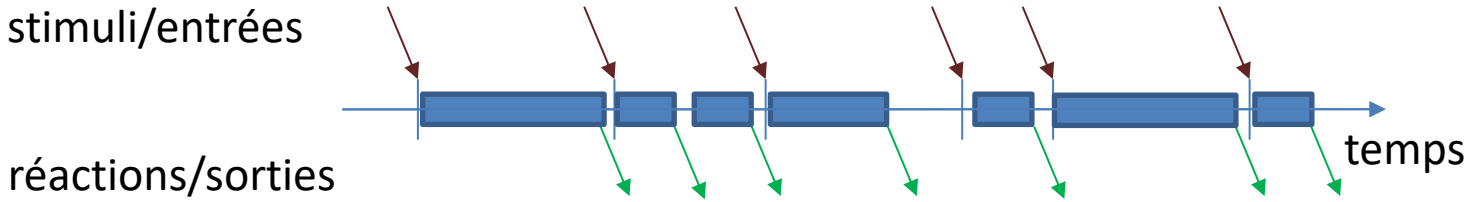


  - Implantation temps réel – un calcul démarré dans un cycle doit finir avant le prochain cycle



Temps logique synchrone

- Synchrone = paradigme en temps logique
  - Modèle formel – calculs instantanés
    - Sorties et entrées sont synchrones -> définition formelle naturelle de la composition (produit synchrone)
  - Implantation temps réel – un calcul démarré dans un cycle doit finir avant la fin du cycle

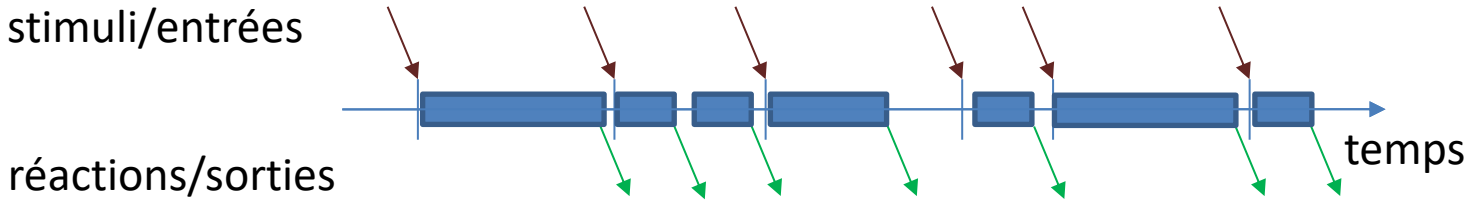



```
loop
  await_stimulus() ;
  read_inputs() ;
  compute() ;
  write_outputs() ;
end
```

Qu'est-ce qu'un trigger?
- Toutes les entrées présentes
- Timer périodique, avec échantillonage des entrées
- Au moins une entrée présente, et les autres gardent l'ancienne valeur

Temps logique synchrone

- Adapté à plusieurs domaines :
  - Contrôle-commande classique
  - Multimédia
  - Algorithmique ML (réseaux de neurones)
  - Modélisation de circuits digitaux




```
loop
  await_stimulus() ;
  read_inputs() ;
  compute() ;
  write_outputs() ;
end
```

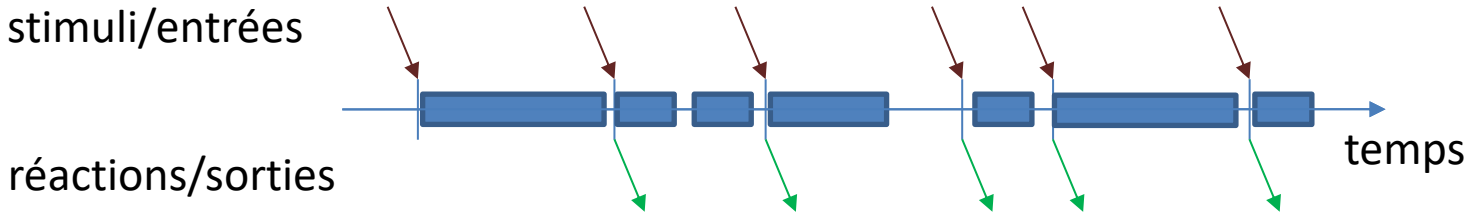
Qu'est-ce qu'un trigger?

- Toutes les entrées présentes
- Timer périodique, avec échantillonage des entrées
- Au moins une entrée présente, et les autres gardent l'ancienne valeur

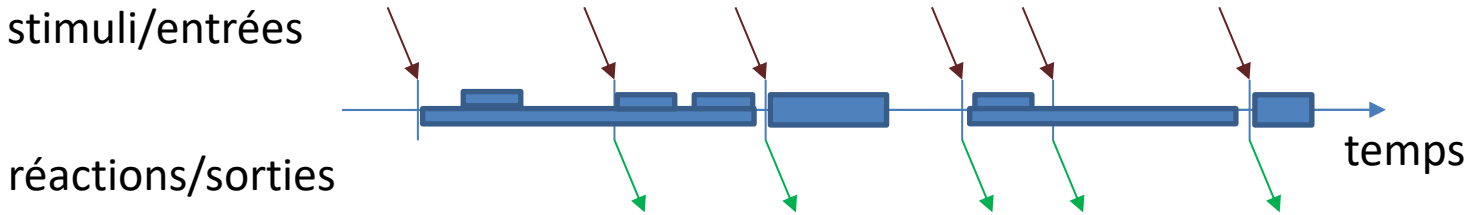
Temps logique LET

Intervention de Fabien Siron, ingénieur de Safran

- LET = logical execution time
  - I/O se font sur les tops de l'horloge logique
  - Chaque calcul a une durée en temps logique



  - Un calcul peut s'étendre sur plus d'un cycle



Programmation synchrone en Heptagon

- Ce que l'on a défini déjà :
  - Appel de fonctions
  - Hiérarchie
  - État
  - Pas de contrôle
- Beaucoup de systèmes industriels peuvent être programmés ainsi
  - Sans aspects « système » comme la gestion d'erreurs
  - PID (proportional/integral/derivative) controller

Programmation synchrone en Heptagon

- Contrôle simple – instruction if

```
z = if c then x else y
```

Flot de données ! Toutes les valeurs sont présentes aux mêmes cycles. Ce n'est pas de l'exécution conditionnelle, mais un choix conditionnel.

cycle	0	1	2	3	4	5	6	…
c	t	f	f		t	f	t	…
x	10	9	8		6	5	4	…
y	1	10	9		7	6	5	…
z	10	10	9		6	6	4	…

Programmation synchrone en Heptagon

- Un compteur avec reset

```
node rcounter(rst:bool) returns (cnt:int)
let
  cnt = if rst then 0 else (0 fby (cnt+1))
tel
```

cycle	0	1	2	3	4	5	6	7	…
rst	f	f	f		f	t	t	f	…
cnt	0	1	2		3	0	0	1	…

Programmation synchrone en Heptagon

- Ce que l'on a défini déjà :
  - Appel de fonctions
  - Hiérarchie
  - État
  - Contrôle simple (affectation conditionnelle – if)
- Beaucoup de systèmes industriels en avionique, rail, automobile, peuvent être programmés ainsi (et le sont !)
  - Tout exécuter a l'avantage de la prédictibilité temporelle

Programmation synchrone en Heptagon

- Ce qui manque : exécution conditionnelle

```
if(c) {
  f(...) ;
} else {
  g(...) ;
}
```

  - Nécessaire pour :
    - Exécution efficace – réduire l'utilisation des ressources
      - Multi-périodes, modes fonctionnels
    - Contrôle conditionnel des actionneurs
      - Peut être encapsulé dans du code qui est toujours exécuté

Programmation synchrone en Heptagon

- Pas de `if` impératif
- Notion fondamentale : l'horloge logique
  - Condition d'activation
    - Décrit la suite de cycles d'exécution (du temps logique) où cette condition est vraie
  - Chaque variable ou calcul a une horloge
    - Horloge d'une variable: horloge logique définissant quand le signal est présent avec une valeur
      - Le signal ne peut pas être utilisé dans les calculs aux autres cycles
      - Mais il doit être bien initialisé aux cycle de son horloge
    - Horloge d'un calcul: horloge logique définissant quand un calcul est réalisé

Horloges logiques

- Dans une trace, on peut énumérer les cycles d'une horloge
  - Horloge de la variable x : {0,1,2,4,6...}
  - Horloge de la variable z : {2,6...}

cycle	0	1	2	3	4	5	6	…
x	10	7	21		9		33	…
c	t	t	f		t		f	…
y	10	7			9			…
z			21				33	…

Horloges logiques

- Avant l'exécution, on peut les identifier par des "expressions d'horloges" (des prédicats)
  - Horloge de y : clk(x) when c (quand c est présent et vrai), clk(x) étant l'horloge de x
  - Horloge de z: clk(x) whenot c (c présent et faux)

cycle	0	1	2	3	4	5	6	…
x	10	7	21		9		33	…
c	t	t	f		t		f	…
y	10	7			9			…
z			21				33	…

c = (x<11)

Définir une horloge (1/6)

- Subsampling

```
y = x when c ;
z = x whenot c ; (* same as x when (not c) *)
```

cycle	0	1	2	3	4	5	6	…
x	10	7	21		9		33	…
c	t	t	f		t		f	…
y	10	7			9			…
z			21				33	…

c = (x<11)

Définir une horloge (2/6)

- Horloge héritée par le flot de données

```
y = x when c ;
z = x whenot c ; (* same as x when (not c) *)

t = f(y) ; (* same clock as y *)
```

cycle	0	1	2	3	4	5	6	…
x	10	7	21		9		33	…
c	t	t	f		t		f	…
y	10	7			9			…
z			21				33	…
t	f(10)	f(7)			f(9)			…

c = (x<11)

Définir une horloge (3/6)

- Reconstruction à partir de résultats partiels

```
y = x when c ;
z = x whenot c ; (* same as x when (not c) *)

t = f(y) ; (* same clock as y *)
u = g(z) ; (* same clock as z *)
r = merge c (true -> t) (false -> u) ; (*same clk as x*)
```

cycle	0	1	2	3	4	5	6	…
x	10	7	21		9		33	…
c	t	t	f		t		f	…
y	10	7			9			…
z			21				33	…
t	f(10)	f(7)			f(9)			…
r	f(10)	f(7)	g(21)		f(9)		g(33)	…

c = (x<11)

Définir une horloge (4/6)

- Reconstruction à partir de résultats partiels

```
y = x when c ;
z = x whenot c ; (* same as x when (not c) *)
c = x<11 ;
t = f(y) ; (* same clock as y *)
u = g(z) ; (* same clock as z *)
r = merge c (true -> t) (false -> u) ; (*same clk as x*)
```

cycle	0	1	2	3	4	5	6	…
x	10	7	21		9		33	…
c	t	t	f		t		f	…
y	10	7			9			…
z			21				33	…
t	f(10)	f(7)			f(9)			…
r	f(10)	f(7)	g(21)		f(9)		g(33)	…

c = (x<11)

Définir une horloge (5/6)

- Reconstruction à partir de résultats partiels

```
c = x<11 ;
r = merge c (true->f(x when c)) (false -> g(x whenot c));
```

cycle	0	1	2	3	4	5	6	…
x	10	7	21		9		33	…
c	t	t	f		t		f	…
y	10	7			9			…
z			21				33	…
t	f(10)	f(7)			f(9)			…
r	f(10)	f(7)	g(21)		f(9)		g(33)	…

c = (x<11)

Définir une horloge (6/6)

- Chaque nœud a une horloge de base (tick = .)
  - Toutes les autres horloges du noeud en sont dérivées
  - Dans notre cours, toutes les entrées et les sorties d'un nœud/fonction ont cette horloge

Horloge de base

- Chaque nœud a une horloge de base (tick = .)
  - Toutes les autres horloges du noeud en sont dérivées
  - Dans notre cours, toutes les entrées et les sorties d'un nœud/fonction ont cette horloge

```
node mynode(i:int;c:bool) returns (o:int) (* . for i, c, o*)
var i1,i2,o1,o2:int ; (* variables locales *)
let
  i1 = i when c ;    (* . when c    *)
  i2 = i whenot c ;  (* . whenot c *)
  o1 = i1 + 1 ;      (* . when c    *)
  o2 = i2 - 1 ;      (* . whenot c *)
  o = merge c (true->o1) (false->o2)  (* . *)
tel
```

cycle	0	1	2	3	4	…
i	10	7	21	33	9	…
c	t	f	t	t	f	…
o	11	6	22	34	8	…

Horloge de base

- Chaque nœud a une horloge de base (tick = .)
  - Toutes les autres horloges du noeud en sont dérivées
  - Dans notre cours, toutes les entrées et les sorties d'un nœud/fonction ont cette horloge

```
node mynode(i:int;c:bool) returns (o:int)
let
  o = merge c
       (true -> (i when c)+1)
       (false -> (i whenot c)-1);
tel
```

cycle	0	1	2	3	4	…
i	10	7	21	33	9	…
c	t	f	t	t	f	…
o	11	6	22	34	8	…

Horloge de base

- Une horloge est toujours relative à un noeud
  - Le tick du nœud instancié est égal à l'horloge des variables d'entrée-sortie
  - Noeud racine: aucun sous-échantillonnage

```
node mynode(i:int;c:bool) returns (o:int)
let
  o = merge c
       (true -> (i when c)+1)
       (false -> (i whenot c)-1);
tel
node main(m:int) returns (n:int)
var d : bool ;
let
  d = m>0 ;
  n = merge d
       (true -> mynode(m when d, (m>9) when d))
       (false -> 11) ; tel
```

cycle	0	1	2	3	4	5	…
i = m when (m>0)	10	7	21	33		9	…
c = (m>9) when (m>0)	t	f	t	t		f	…
o	11	6	22	34		8	…
m	10	7	21	33	-2	9	…
n	11	6	22	34	11	8	

Syntaxe plus familière

- Pseudo-impérative

```
node abc(i:int) returns (o:int)
let
  if i>0 then
    var a : int ; in
      a = i*i ;
      o = i+a ;
  else
    o = i + 1 ;
  end
tel
```

Syntaxe plus familière

- Pseudo-impérative

```
node abc(i:int) returns (o:int)
let
  if i>0 then
    var a : int ; in (* var locales du bloc d'instructions *)
      a = i*i ;
      o = i+a ;
  else
    o = i + 1 ;
  end
tel
```

Syntaxe plus familière

- Pseudo-impérative (mais ce n'est pas du C) :

```
node abc(i:int) returns (o:int)
let
  if i>0 then
    var a : int ; in
      a = i*i ;
      o = i+a ;
  else
    o = i + 1 ;
  end
tel
```

```
node abc1(i:int) returns (o:int)
var c : bool ;
    a,i1,i2 : int ;
let
  c = (i>0); i1 = i when c; i2 = i whenot c;
  a  = i1*i1 ;
  o1 = i1 + a ;
  o2 = i2 + 1 ;
  o = merge c (true -> o1) (false -> o2) ;
tel
```

Syntaxe plus familière

- Pseudo-impérative (mais ce n'est pas du C) :

```
node jkl (i:int) returns ()
let
  if i>0 then
    () = f() ;
  else
    () = g() ;
  end
tel
```

```
node jkl1(i:int) returns ()
let
  () = f() ;
  () = g() ;
tel
```

  - Le conditionnement passe toujours par les vars
    - Le seul moyen de conditionner un appel de fonction sans entrées ou sorties -> l'incorporer à un nœud avec entrées

Syntaxe plus familière

- Pseudo-impérative (mais ce n'est pas du C) :

```
node jkl2(i:int) returns ()
let
  if i>0 then
    () = callf(i) ;
  else
    () = callg(i) ;
  end
tel
```

```
node callf(i:int) returns ()
let
  () = f() ;
tel
```

```
node jkl3(i:int) returns ()
let
  () = callf(i when (i>0)) ;
  () = callg(i whenot (i>0)) ;
tel
```

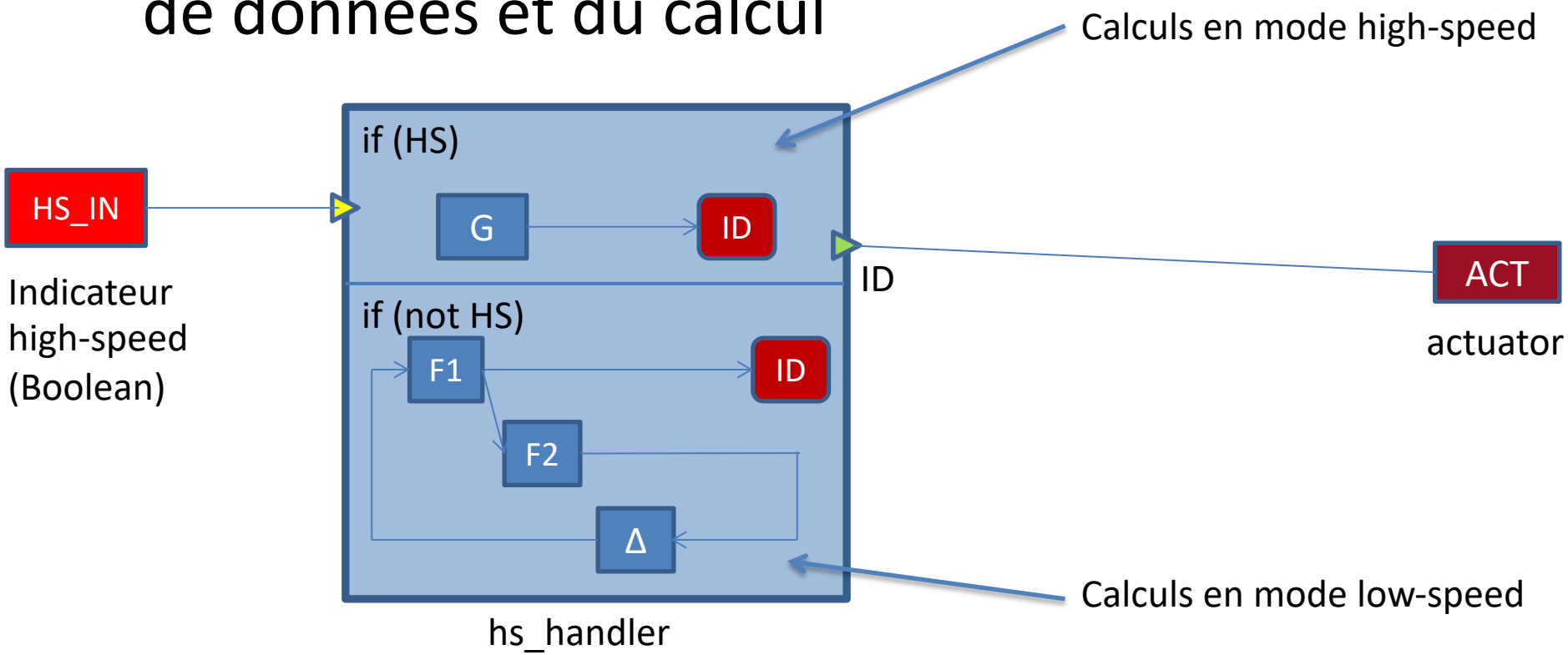
  - Le conditionnement passe toujours par les vars
    - Le seul moyen de conditionner un appel de fonction sans entrées ou sorties -> l'incorporer à un nœud avec entrées

Un exemple plus compliqué

- Modèle de contrôleur de moteur à essence
- Exécution cyclique
  - 1 cycle synchrone par rotation du moteur
  - Calcul de l'allumage du cycle suivant
- Vitesse variable du moteur => palliers de vitesse
  - À haute vitesse, moins de temps pour faire le calcul de l'allumage

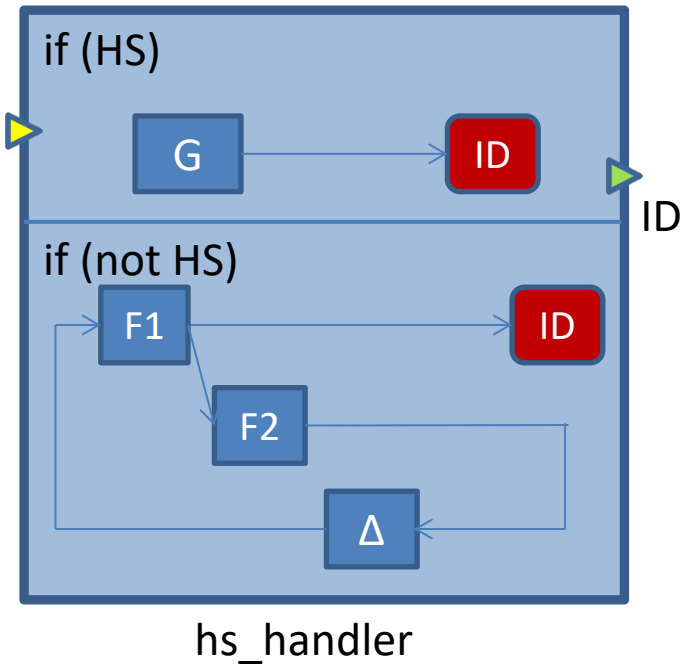
Un exemple plus compliqué

- Les fonctions G, F1 font à la fois de la capture de données et du calcul



Un exemple plus compliqué

- Modèle Heptagon de hs_handler :



hs_handler

```
node hs_handler(hs:bool)
     returns (id:int)
let
  if hs then
    id = g() ;
  else
    var x,y : int; in
      y = 15 fby x ;
      id = f1(y) ;
      x = f2(id) ;
  end ;
tel
```

Un exemple plus compliqué

- Modèle Heptagon du système

```
(* definition of hs_handler *)
...

node main () returns ()
var
  hs: bool ;
  id : int ;
let
  hs = read_bool(addr_hs) ;
  id = hs_handler(hs) ;
  () = act(id) ;
tel
```

Un exemple plus compliqué

- Modèle Heptagon du système

```
(* definition of hs_handler *)
...

node main () returns ()
var
  hs: bool ;
  id : int ;
let
  hs = read_bool(addr_hs) ;
  id = hs_handler(hs) ;
  () = act(id) ;
tel
```

Convention:
Une spécification "système" n'a pas d'entrée ou de sortie. Elles sont acquises par des fonctions de lecture de capteurs et d'écriture d'actionneurs

Un exemple plus compliqué

- Constante addr_hs :

```
const addr_hs:int = 0x2000 (* global constant *)

(* definition of hs_handler *)
...

node main () returns ()
var
  hs: bool ;
  id : int ;
let
  hs = read_bool(addr_hs) ;
  id = hs_handler(hs) ;
  () = act(id) ;
tel
```

Un exemple plus compliqué

- Définitions externes :

```
open Externc (* declaration of external functions *)

const addr_hs:int = 0x2000 (* global constant *)

(* definition of hs_handler *)
...

node main () returns ()
var
  hs: bool ;
  id : int ;
let
  hs = read_bool(addr_hs) ;
  id = hs_handler(hs) ;
  () = act(id) ;
tel
```

Un exemple plus compliqué

- Définitions externes :

```
open Externc (* declaration of external functions *)
```

  - L'implémentation peut être fournie :
    - En Heptagon : dans un fichier externc.ept
      - Fichier abc.ept -> "open Abc"
      - Impossible ici, car Heptagon n'a pas des fonctions d'I/O
    - En C
      - Interface Heptagon dans un fichier externc.epi
        - » Fichier abc.epi -> "open Abc"
      - Source C :
        - » Deux fichiers de déclarations : externc.h, externc_types.h
        - » Des fichiers source avec l'implémentation, e.g. externc.c

Un exemple plus compliqué

- Implémentation en C. Fichier externc.epi :

```
val fun read_bool(addr:int) returns (value:bool)
val fun f1 (i:int) returns (o:int)
val fun f2 (i:int) returns (o:int)
val fun g () returns (o:int)
val fun act (i:int) returns ()
```

  - Toutes les fonctions utilisées, mais non-définies en Heptagon, doivent être déclarées dans un fichier .epi inclus
  - On peut déclarer fonctions, nodes, types, const.
  - Le(s) fichiers .epi doivent être compilés :

```
heptc –c externc.epi
```

    - Cela produit le fichier externc.epci

Un exemple plus compliqué

- Implémentation en C. Fichier externc.h:

```
typedef struct { int value ; } Externc__read_bool_out ;
typedef struct { int o ; }     Externc__f1_out ;
typedef struct { int o ; }     Externc__f2_out ;
typedef struct { int o ; }     Externc__g_out ;
typedef struct { }             Externc__act_out ;

void Externc__f1_step(int i,Externc__f1_out*_out) ;
void Externc__f2_step(int i,Externc__f2_out*_out) ;
void Externc__g_step(Externc__g_out*_out) ;
void Externc__read_bool_step(int addr,
                             Externc__read_bool_out*_out) ;
void Externc__act_step(int addr, Externc__act_out*_out) ;
```

Un exemple plus compliqué

- Implémentation en C. Fichier externc.h:

```
typedef struct { int value ; } Externc__read_bool_out ;
typedef struct { }             Externc__act_out ;

void Externc__f1_step(int i,Externc__f1_out*_out) ;
```

  - Les noms C suivent les mêmes conventions que le code généré par heptc
  - On peut définir : fonctions, noeuds, types, constantes

Un exemple plus compliqué

- Implémentation en C. Fichier externc.c:

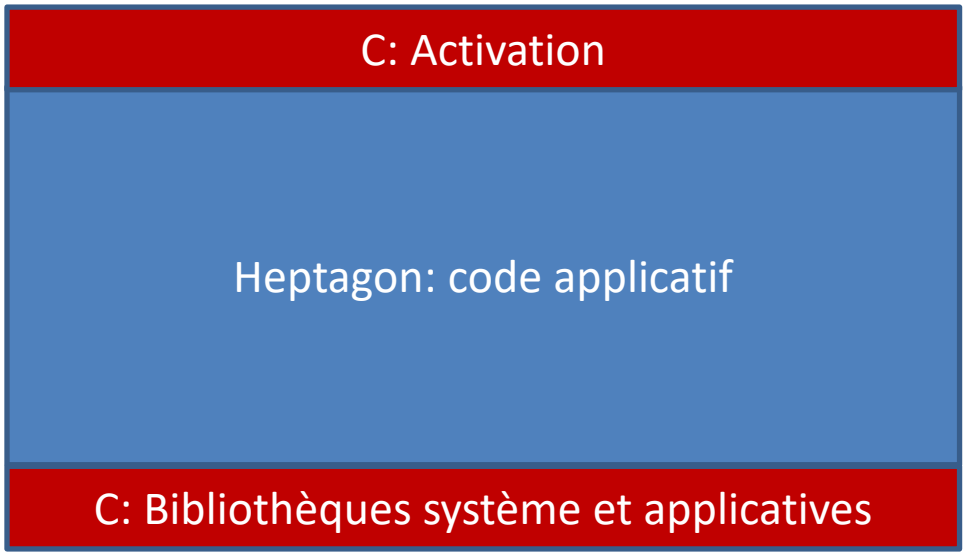
```
void Externc__read_bool_step(int addr,
                             Externc__read_bool_out*_out) {
  printf("read_bool(%d):",addr) ; fflush(stdout) ;
  scanf("%d",&(_out->value)) ;
}
void Externc__f2_step(int i,Externc__f2_out*_out) {
  _out->o = i + 5 ;
  printf("F2(%d)=%d\n",i,_out->o) ;
}
void Externc__g_step(Externc__g_out*_out) {
  static int s = 0 ;
  s += 7 ;
  _out->o = s ;
  printf("G()=%d\n",_out->o) ;
}
...
```

Un exemple plus compliqué

- Compilation :
  - D'abord les interfaces Heptagon .epi
  - Ensuite les fichiers .ept
  - Ensuite, compilation du code C :
    - code C de externc.c (et autres bibliothèques)
    - code C généré pour les fichiers .ept
    - le code C avec la fonction main (appel cyclique, comme la dernière fois)

Interface Heptagon-C

- Structure d'une application Lustre/Heptagon



main.c

Fichiers .c et .h générés par heptc

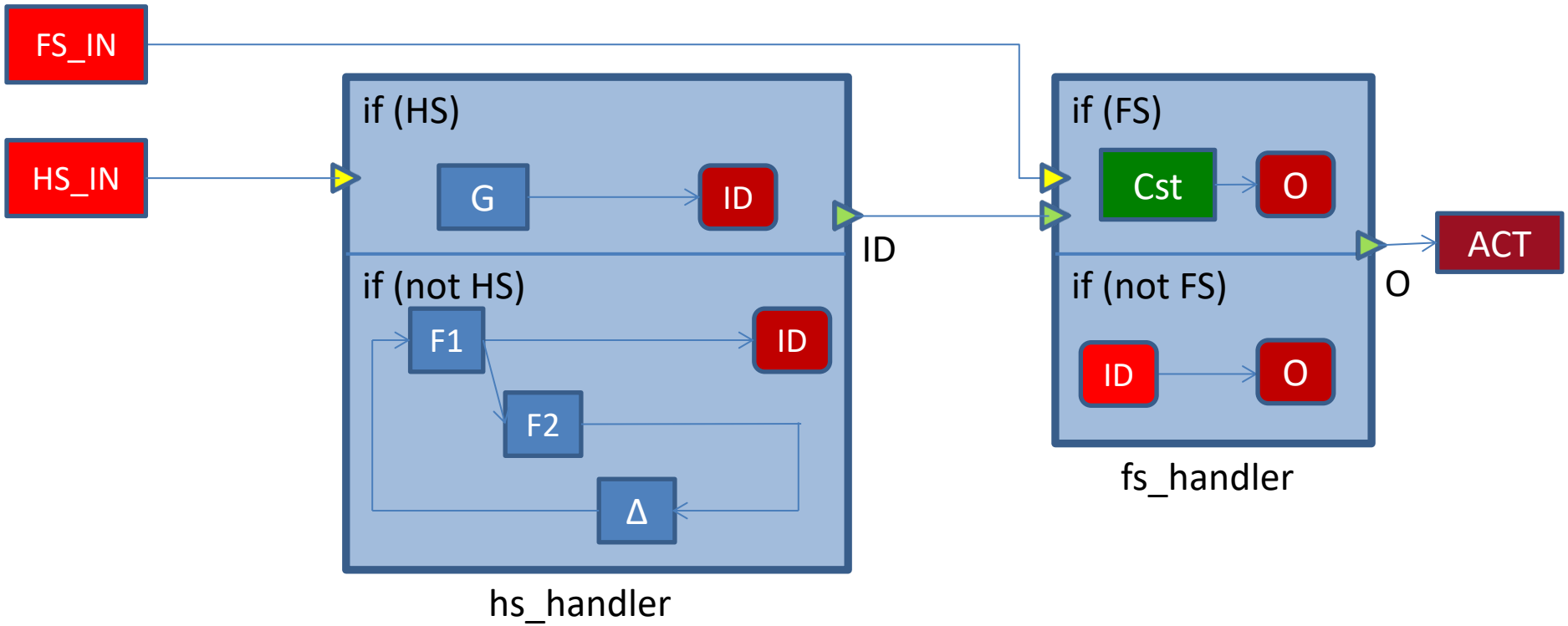
- Implantations de fichiers .epi
- Autres bibliothèques appelées depuis main.c ou depuis l'implantation de fichiers .epi

Un exemple plus compliqué (v2)

- Tolérance aux pannes par des méthodes de dégradation progressive
  - Capteurs fautifs => le résultat du calcul n'est pas valide
    - Détecté par des moyens externes à notre application (OS, autre application...)
    - Quand cela arrive, contrôle moteur avec des valeurs par défaut
      - Moins efficace, mais sûr

Un exemple plus compliqué (v2)

- Flot de données :



Un exemple plus compliqué (v2)

- Noeuds "fs_handler" et "main" :

```
node main () returns ()
var
  hs : bool ;
  id : int ;
  fs : bool ;
  o  : int ;
let
  hs = read_bool(addr_hs) ;
  id = hs_handler(hs) ;
  fs = read_bool(addr_fs) ;
  () = fs_handler(fs,id) ;
tel
```

```
node fs_handler(fs:bool;id:int)
                  returns ()
var
  x:int ;
let
  x = merge fs
        (true -> default_ignition)
        (false -> id whenot fs);
  () = act(x) ;
tel
```

Préparation du TP

- Programmer et exécuter trois objectifs :
  - Exemple du transparent 26 (rcounter)
    - À chaque cycle, lecture de rst depuis le clavier (demander un booléen 0/1)
  - L'exemple du transparent 60/62
    - Lecture de FS, HS depuis le clavier, à chaque cycle (booléen 0/1)
    - Compilation et execution cylique
      - Implémentation des fonctions de externc.epi en suivant l'exemple du transparent 49
        - » f1(x) = x+5
        - » f2(x) = x +100
        - » g() = counter starting at 300 and which advances by steps of 50
  - Réecrire l'exemple du transparents 60/62 en remplaçant dans hs_handler "if" par “when” et “merge”
    - Expression native flot de données