Une approche synchrone à la conception de systèmes embarqués temps réel

Dumitru Potop-Butucaru

dumitru.potop@inria.fr

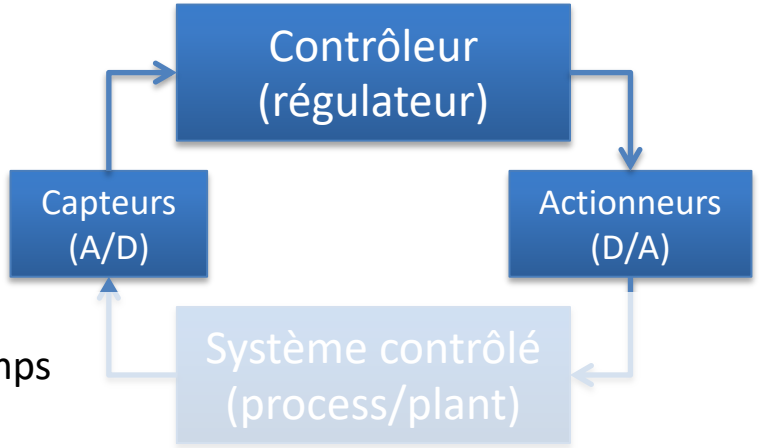
cours EPITA, 2024, 3ème séance

Contenu

- Comment construit-on une spécification fonctionnelle ?
  - Cas d'étude GNC (avionique aérospatiale)
  - Programmation de GNC
- Programmation Heptagon
  - Types de données structurés
  - Paramètres statiques
- Préparation du TP
  - Programmation de l’exemple GNC

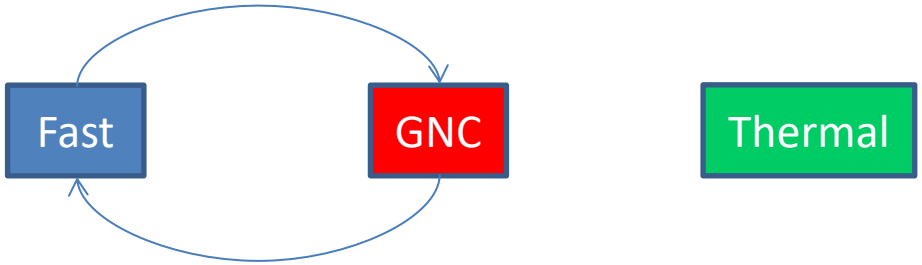
Spécification d'un contrôleur

- Que faut-il représenter ?
  - Calculs cycliques
  - État
  - Multi-tâches
    - Modularité, concurrence, temps réel
  - Exécution conditionnelle
    - Multi-périodes
      - On ne peut pas tout exécuter tout le temps
      - Actionneurs
  - Communication entre tâches
    - Mémoire partagée (multi-thread, multi-coeurs)
    - Passage de messages (distribué, dataflow, isolation spatiale)
  - Synchronisation et temps réel
    - Contraintes venant de l'automatique (e.g. freshness – non-fonctionnel converti en fonctionnel)
    - Préservation de sémantique (parallélisation)

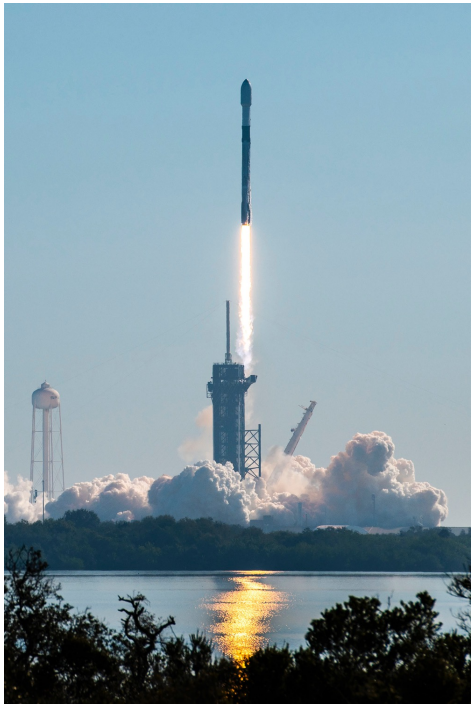


Exemple GNC

- 3 tâches Fast, GNC, Thermal
  - Fast et GNC communiquent



Exemple GNC

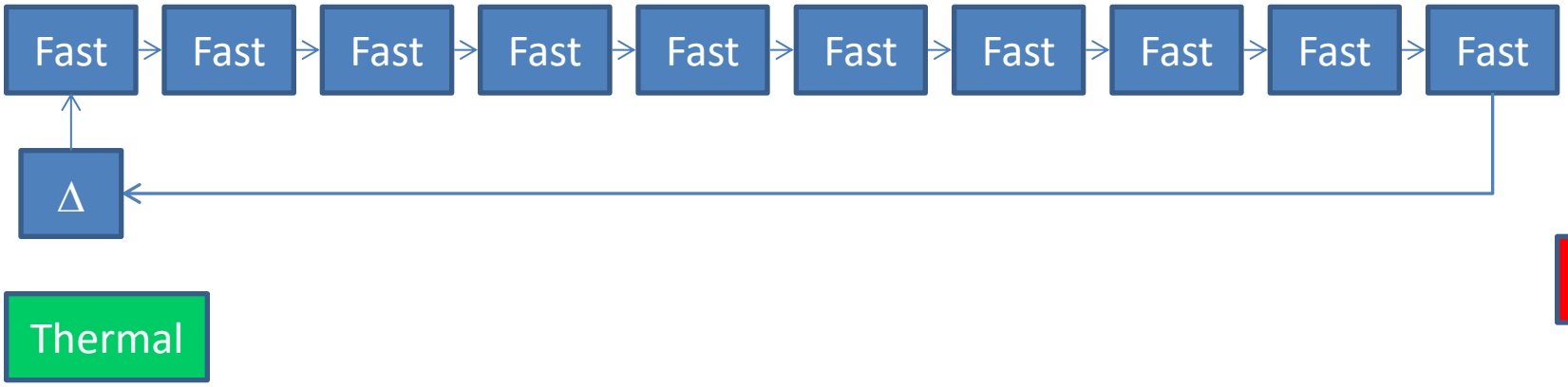


- 3 tâches Fast, GNC, Thermal
  - Fast et GNC communiquent
- Periodes: 100ms, 1s, 1s
  - Fast = I/O et contrôle en boucle rapide
  - GNC = Guidance, navigation, and control
  - Thermal = gestion thermique

https://en.wikipedia.org/wiki/Guidance,_navigation,_and_control
http://manuscript.elsevier.com/S0094576515003811/pdf/S0094576515003811.pdf
https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_thermal_control

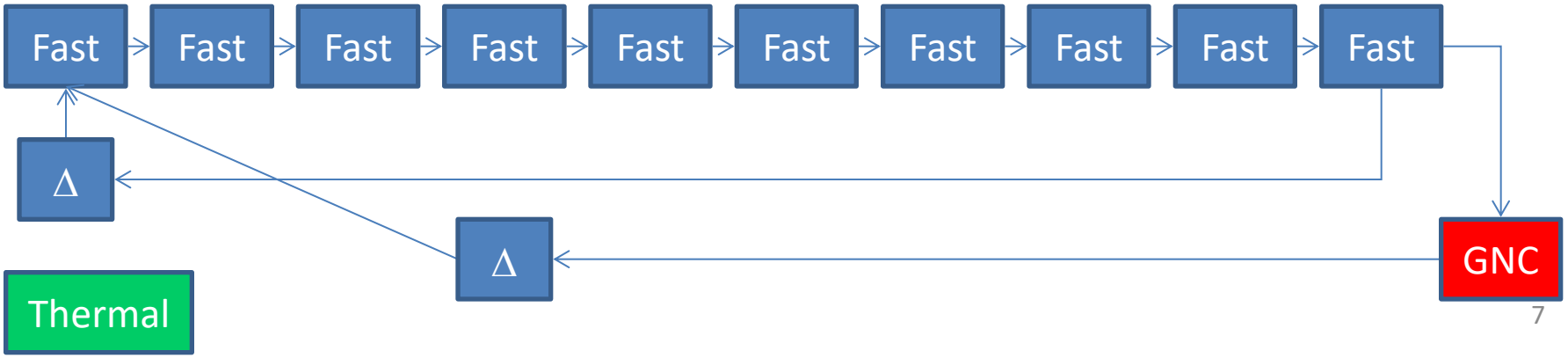
Exemple GNC

- Periodes: 100ms, 1s, 1s
  - Chaque seconde, 10 instances de Fast et 1 instance de GNC et de Thermal
    - Hyper-période = PPCM(périodes des tâches)
  - La manière dont Fast, GNC, Thermal se synchronisent n'est pas définie dans la spécification initiale



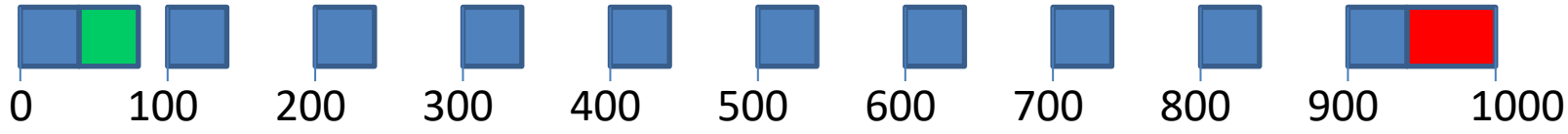
Exemple GNC

- Motif de communication déterministe désiré
  - Artéfact d'implémentation
    - Plusieurs choix possibles
  - Motif de communication sur l'hyper-période
    - Motif qui se répète dans le temps



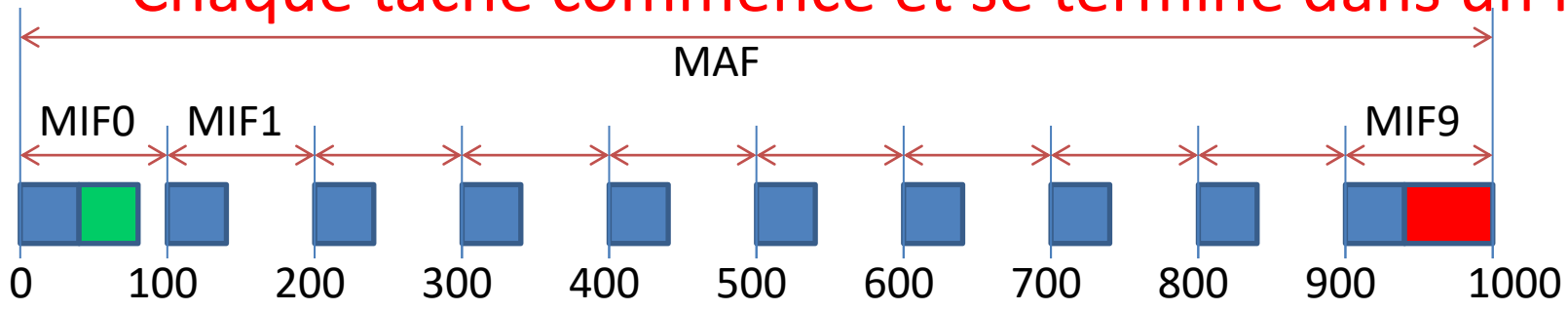
Exemple GNC

- Choix d'implantation classique :
  - Single-core
  - Ordonnancement temps réel "time-triggered"
    - Hypothèse : WCETs: 40ms, 60ms et 40ms
      - WCET = Worst-Case Execution Time (durée maximale)
    - Déclenchements sur barrière de 100ms
      - Time-triggered pour les débuts de fenêtre + ordre fixe



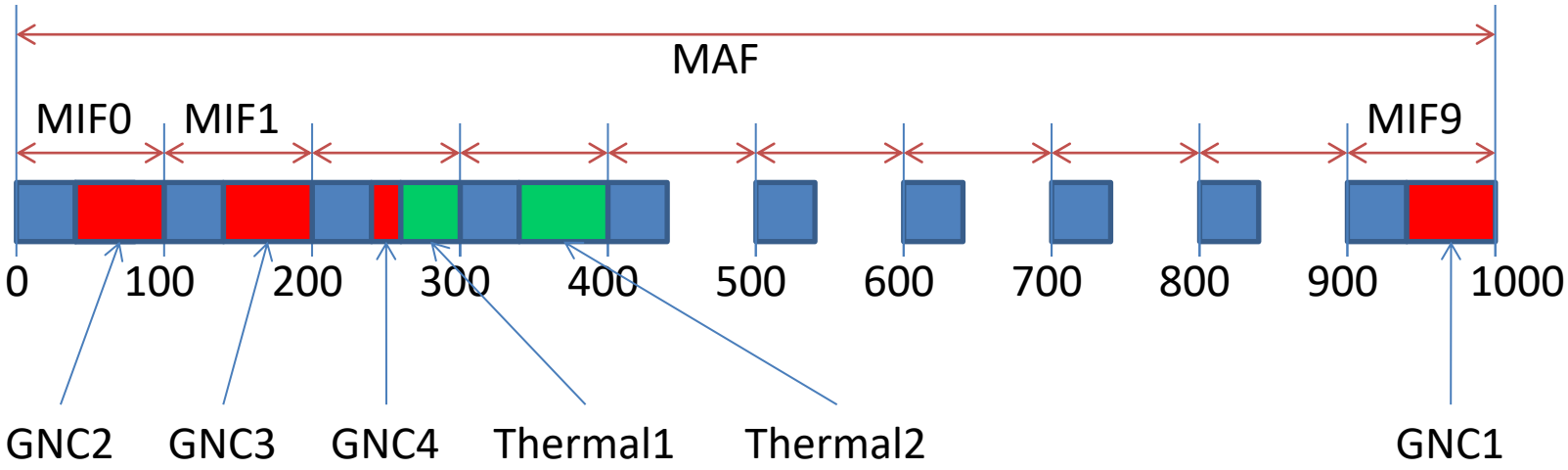
Exemple GNC

- Sous-cas : MIF/MAF
  - Major Frame (MAF) = hyper-période
  - Minor Frame (MIF) = période la plus courte
    - Déclenchement périodique en début de MIF
  - Chaque tâche commence et se termine dans un MIF



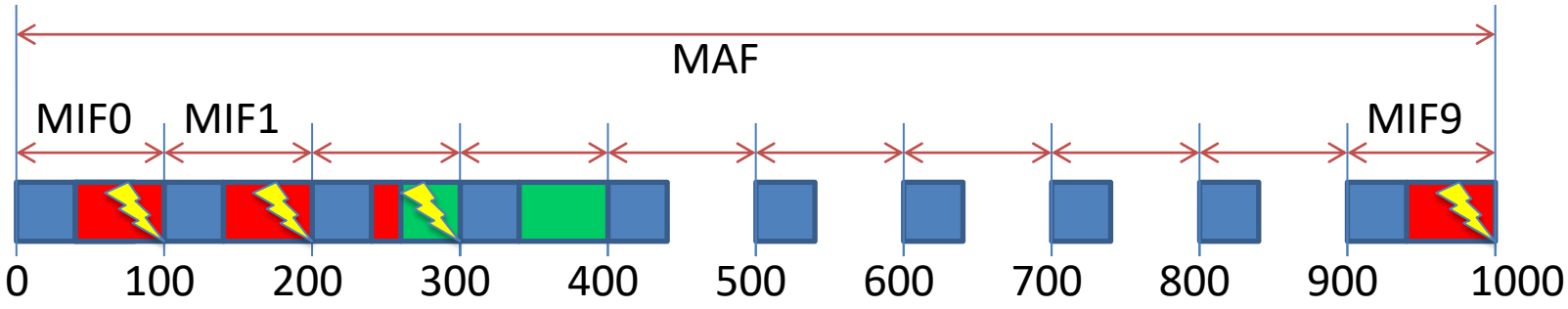
Exemple GNC

- Et si on augmente le WCET de GNC à 200ms et de WCET de Thermal à 100ms (plus réaliste) ?
  - Solution 1 : découper manuellement :
    - GNC -> GNC1, GNC2, GNC3, GNC4
    - Thermal -> Thermal1, Thermal2



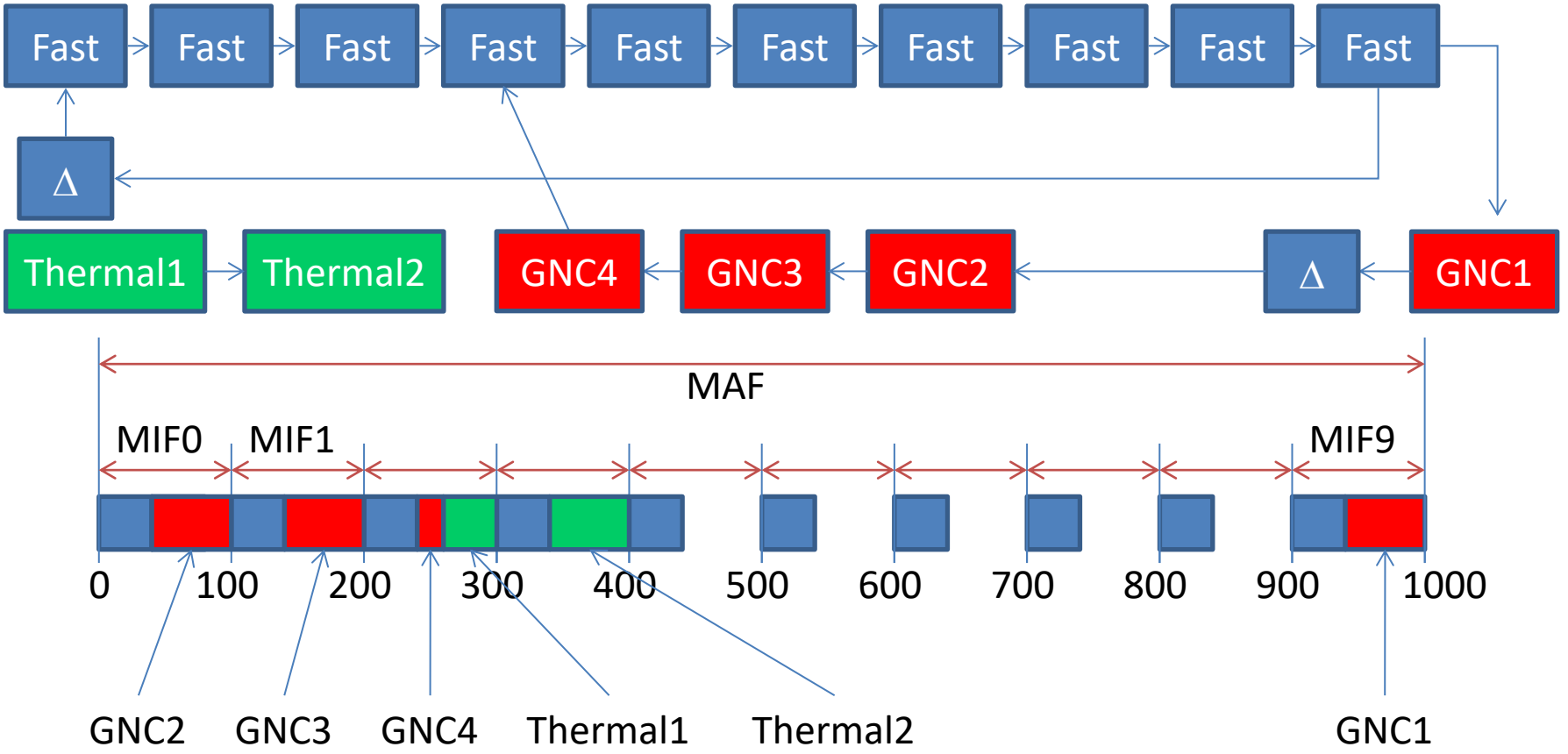
Exemple GNC

- Et si on augmente le WCET de GNC à 200ms et de WCET de Thermal à 100ms (plus réaliste) ?
  - Solution 2 : utiliser un OS préemptif (e.g. ARINC 653)



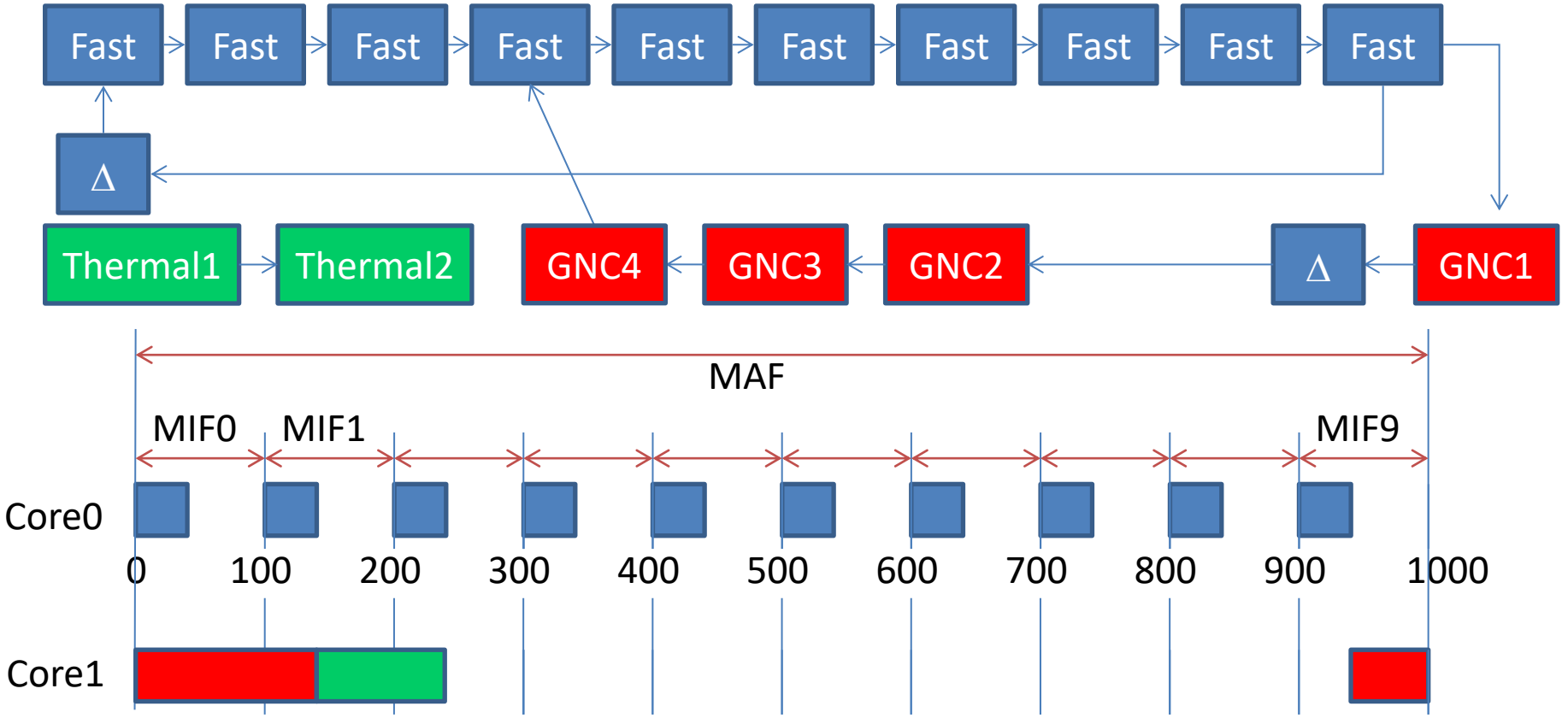
Exemple GNC

- Attention : la fonctionnalité change !



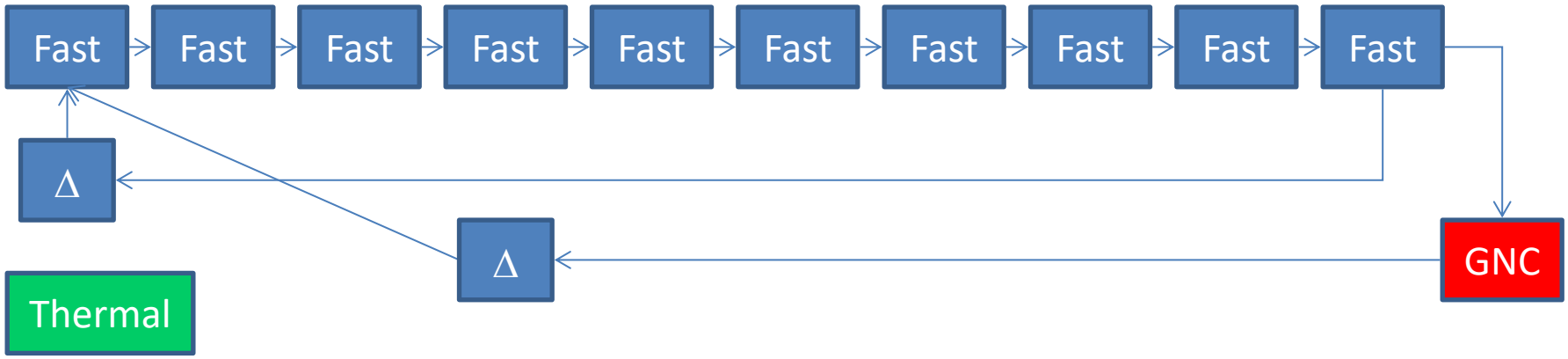
Exemple GNC

- Exécution sur un dual-core

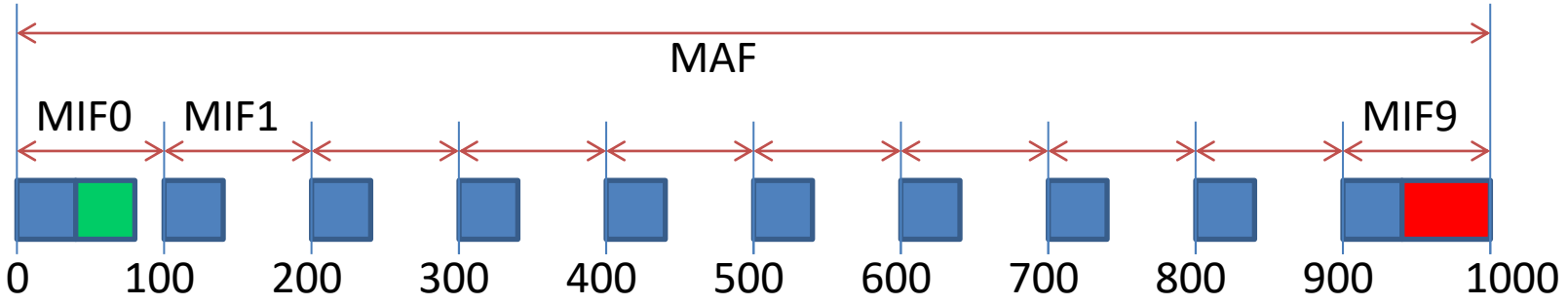


Programmation de l'exemple GNC

- Fonctionnalité

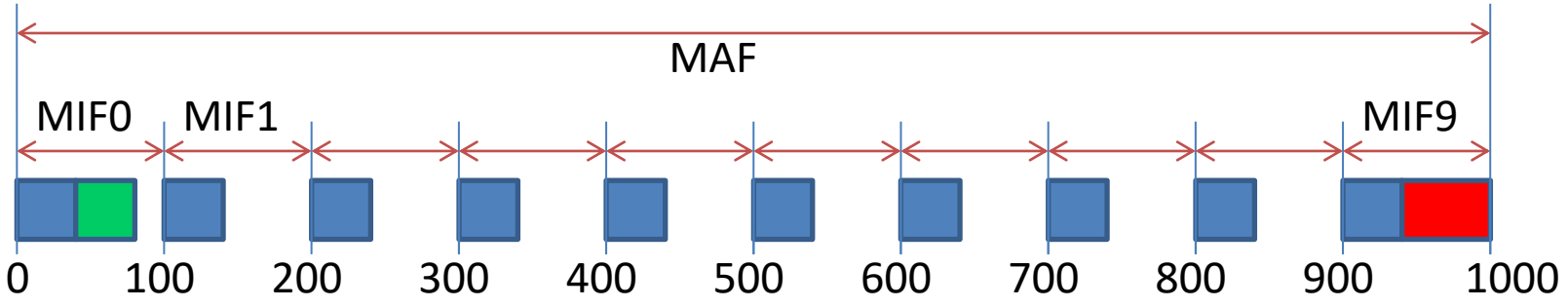


- Implémentation désirée



Programmation de l'exemple GNC

- Programme Heptagon
  - Un cycle du programme synchrone = un MIF
    - Code résultant de la compilation à appeler à chaque MIF
      - Solution complète pour le cas séquentiel
      - Pour du code parallèle, le problème de parallélisation reste non-résolu
    - L'affectation des tâches aux MIFs est faite par le programmeur

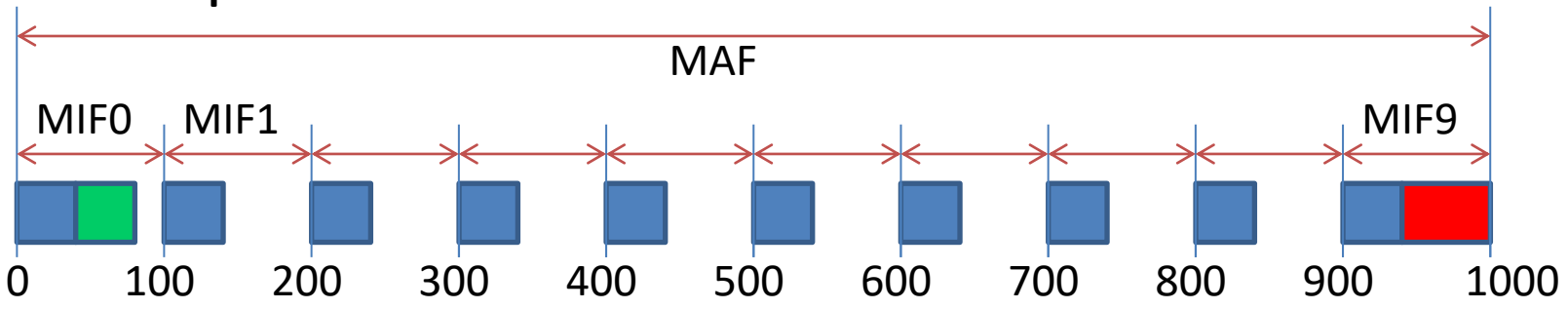


Programmation de l'exemple GNC

- Conditions d'activation
  - MIF modulo counter

```
(* Clock computation *)
mif_cnt = 0 fby ((mif_cnt+1)%10) ;
clk_f = true ;
clk_thermal = (mif_cnt = 0) ;
clk_gnc = (mif_cnt = 9) ;
```

  - f activé à chaque MIF
  - thermal activé au premier MIF de chaque MAF
  - gnc activé au dernier MIF (d'index 9) de chaque MAF, après Fast

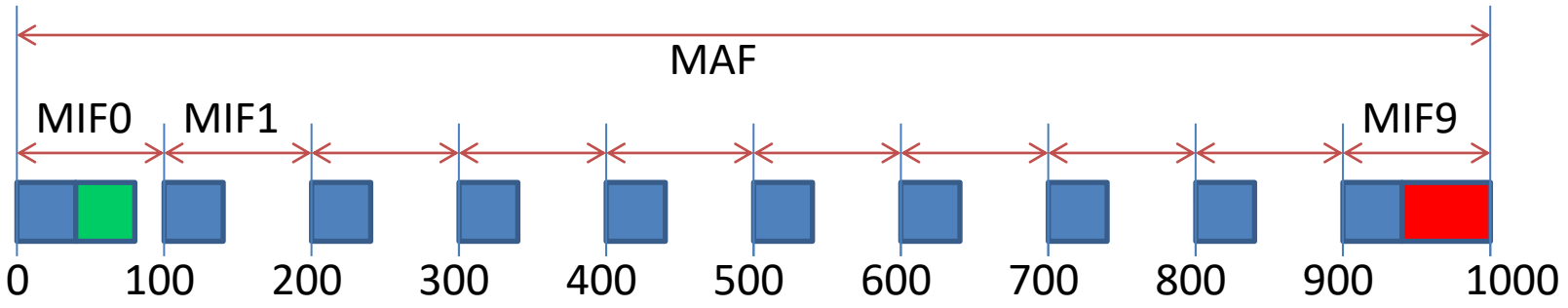


Programmation de l'exemple GNC

- Activation conditionnelle et maintien des valeurs de sortie – construction CONDACT

```
node condact_gnc<<x_init:int>>(c:bool; y:int) returns (x:int)
let
  x = merge c
        (true  -> gnc (y when c))
        (false -> (x_init fby x) whenot c) ;
tel
```

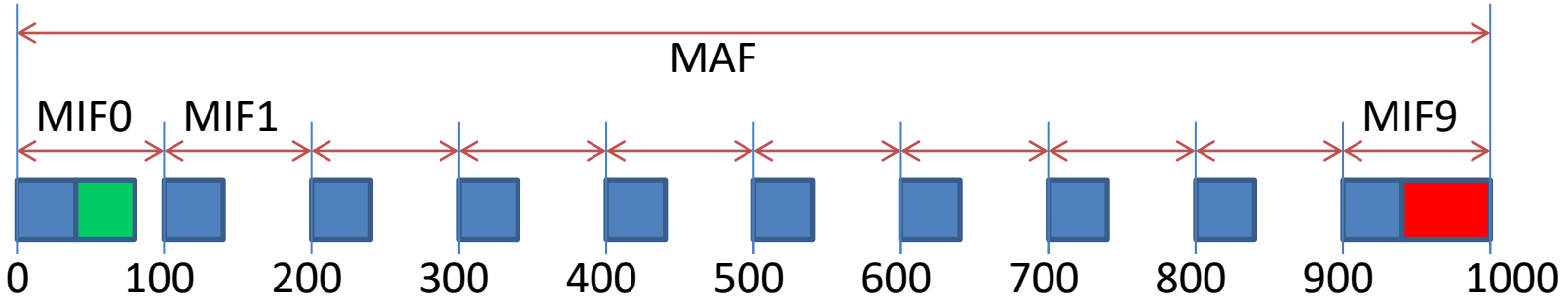
Paramètre statique



Programmation de l'exemple GNC

- Activation conditionnelle et maintien des valeurs de sortie – construction CONDACT

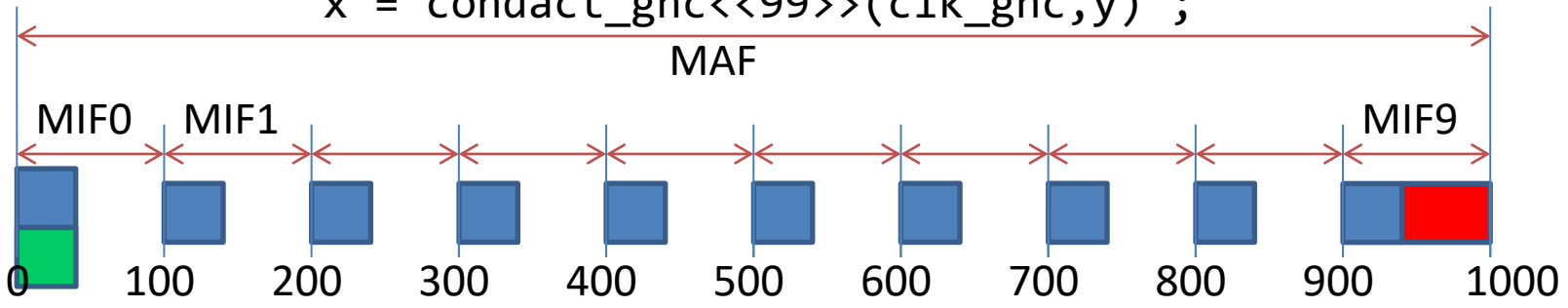
cycle	0	1	2	3	4	5	…
y	10	7	21	3	4	1	…
c	f	t	f	t	f	t	…
gnc(y when c)		v1		v2		v3	…
condact_gnc<<99>>(c,y)	99	v1	v1	v2	v2	v3	…



Programmation de l'exemple GNC

- Flot de données global – attention au MIF 0

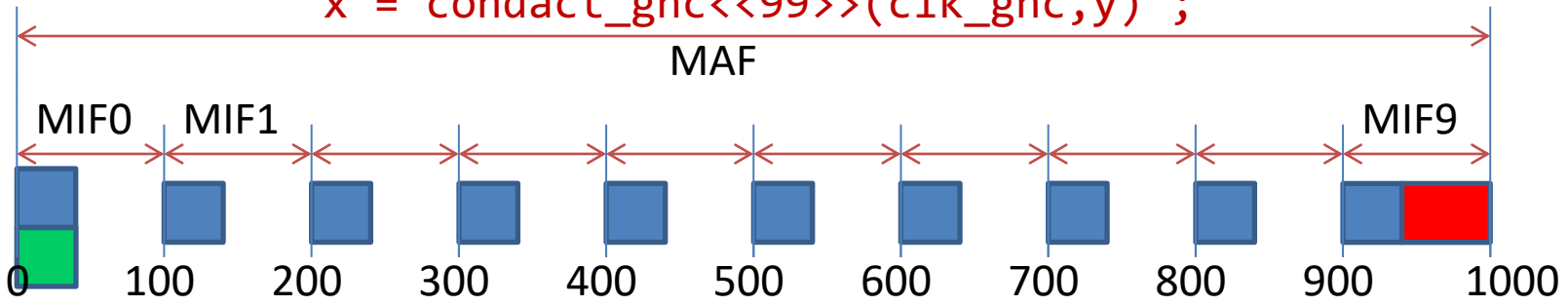
```
(* Clock computation *)
mif_cnt = 0 fby ((mif_cnt+1)%10) ;
clk_f = true ;
clk_thermal = (mif_cnt = 0) ;
clk_gnc = (mif_cnt = 9) ;
(* Flot de données *)
y = condact_f<<31>>(clk_f,x) ;
()= condact_thermal(true when clk_thermal) ;
x = condact_gnc<<99>>(clk_gnc,y) ;
```



Programmation de l'exemple GNC

- Flot de données global – dépendance cyclique

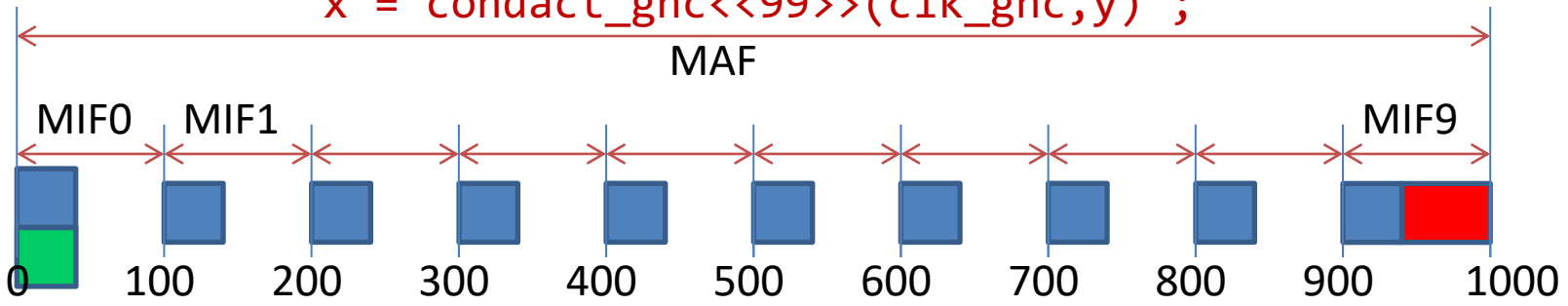
```
(* Clock computation *)
mif_cnt = 0 fby ((mif_cnt+1)%10) ;
clk_f = true ;
clk_thermal = (mif_cnt = 0) ;
clk_gnc = (mif_cnt = 9) ;
(* Flot de données *)
y = condact_f<<31>>(clk_f,x) ;
()= condact_thermal(true when clk_thermal) ;
x = condact_gnc<<99>>(clk_gnc,y) ;
```



Programmation de l'exemple GNC

- Flot de données global – dépendance cyclique

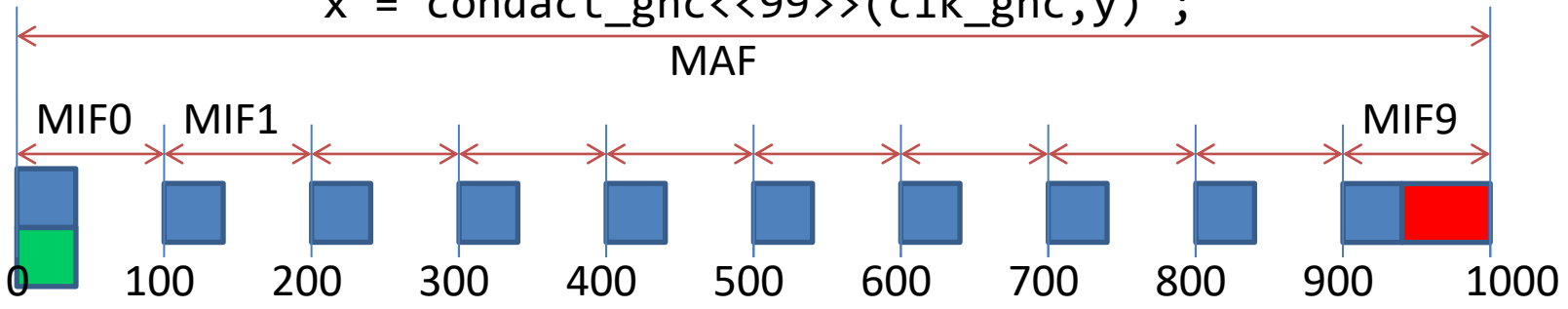
```
(* Clock computation *)
mif_cnt = 0 fby ((mif_cnt+1)%10) ;
clk_f = true ;
clk_thermal = (mif_cnt = 0) ;
clk_gnc = (mif_cnt = 9) ;
(* Flot de données *)
y = condact_f<<31>>(clk_f,99 fby x) ;
()= condact_thermal(true when clk_thermal) ;
x = condact_gnc<<99>>(clk_gnc,y) ;
```



Programmation de l'exemple GNC

- Activation conditionnelle de Thermal
  - Cf. cours 2, transparents 44-45

```
(* Clock computation *)
mif_cnt = 0 fby ((mif_cnt+1)%10) ;
clk_f = true ;
clk_thermal = (mif_cnt = 0) ;
clk_gnc = (mif_cnt = 9) ;
(* Flot de données *)
y = condact_f<<31>>(clk_f,99 fby x) ;
()= condact_thermal(true when clk_thermal) ;
x = condact_gnc<<99>>(clk_gnc,y) ;
```



Programmation de l'exemple GNC

- Flot de données global

```
node main() returns ()
var mif_cnt,x,y:int; clk_f,clk_gnc,clk_thermal:bool; let
  (* Clock computation *)
  mif_cnt = 0 fby ((mif_cnt+1)%10) ;
  clk_f = true ;
  clk_thermal = (mif_cnt = 0) ;
  clk_gnc = (mif_cnt = 9) ;
  (* Flot de données *)
  y = condact_f<<31>>(clk_f,99 fby x) ;
  ()= condact_thermal(true when clk_thermal) ;
  x = condact_gnc<<99>>(clk_gnc,y) ;
tel
```

Contenu

- Comment construit-on une spécification fonctionnelle ?
  - Cas d'étude GNC (avionique aérospatiale)
  - Programmation de GNC
- Programmation Heptagon
  - Types de données structurés
  - Paramètres statiques
- Préparation du TP
  - Programmation de l’exemple GNC

Programmation synchrone en Heptagon

- Ce que l'on a défini déjà :
  - Appel de fonctions
  - Hiérarchie
  - État
  - Contrôle simple
    - Opérateur "if"
  - Exécution conditionnelle
    - Horloges logiques (clocks)
    - Opérateurs "when" et "merge"
      - C'est le flot de données qui conditionne un calcul!
    - Sucre syntaxique de style impératif
      - Conversion vers flot de données

Types de données structurées

- Enregistrements

```
type complex =
  {
    re : float ;
    im : float (* no ";" here *)
  }
```

  - Traduction en C par "struct"
  - Accès aux éléments d'un enregistrement :

```
(* Accès à un champ *)
z = x.re ;
(* Définition d'une valeur à partir de var et const *)
(* Attention, c'est 17.0, et non pas 17 ou 17. *)
x = { re = r ; im = 17.0 }
(* Valeur par modification d'une autre *)
u = { x with .im = 36.7 }
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - La declaration est possible, mais pas nécessaire

```
type monvecteur = int^10 (* type alias *)
type monvecteur2d = int^10^15 (* 15 fois 10 entiers *)
...
var
  x : monvecteur ;
  y : int^10 ;...
let
  y = x ;...
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - La declaration est possible, mais pas nécessaire

```
type monvecteur = int^10 (* type alias *)
type monvecteur2d = int^10^15 (* 15 fois 10 entiers *)
...
var
  x : monvecteur ;
  y : int^10 ;...
let
  y = x ;...
```

  - Traduction en vecteurs et pointeurs du langage C

```
// myfile_types.h
typedef int Myfile__monvecteur[10] ;
// myfile.c
for(i=0;i<10;++i) { y[i] = x[i]; } /* copie de vecteur*/
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Peuvent être arguments de noeuds
    - Transmis par référence dans le code généré
      - mais un vecteur C est déjà une référence

```
// Heptagon definitions
type monvecteur = int^10 (* type alias *)
node mynode(i1:int;i2:monvecteur) returns (o:monvecteur)

// C code – generated or hand-written
void Myfile__mynode_step(int i1;
                         Myfile__monvecteur i2;
                         Myfile__monvecteur o;) {...}
```

  - **Attention à la définition de fonctions externes !**

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Accès aux champs d'un vecteur `x:int^10`
    - Sûreté par construction
      - Pas d'accès en dehors des limites du tableau
    - Accès par index constant

```
y = x[4] ; (* Accès par indice constant => OK *)
z = x[10] ; (* Indice erronné, rejeté par heptc *)
```

    - Accès par index variable (deux variantes) – code coûteux

```
i = f(j) ;
t = x[>i<] ; (* Accès par indice variable. Vérification
              * dynamique. Si <0, x[0], si >=4, x[3] *)
u = x.[i] default 25.0 ; (* Indice variable. Si erronné,
                            25.0 *)
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Construction de vecteurs :

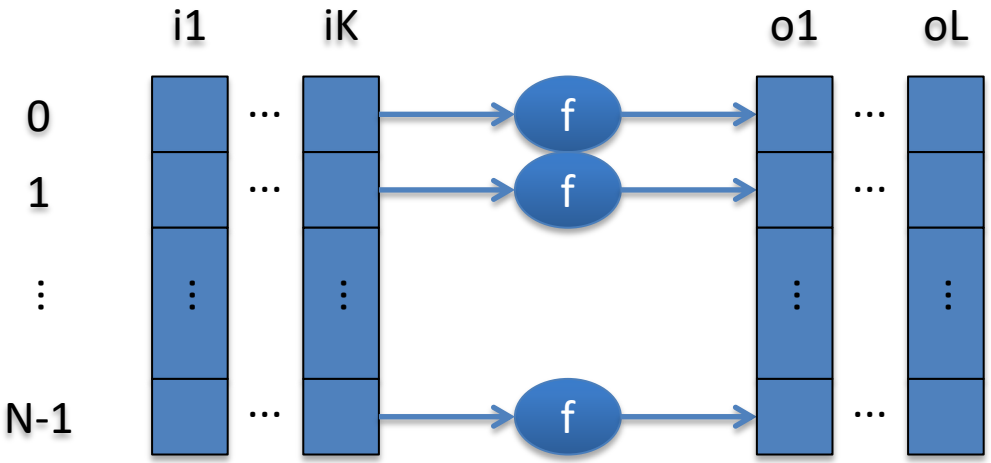
```
const x:float^4 = [ 0.5, 1.5, (-.2.0), 3.4 ]
const c:complex^2 = [ { re = 0.7 ; im = 45.6 },
                      { re = 6.3 ; im =  0.9 } ]


(* attention aux opérations sur flottants *)
y = [ (c[1]).re +. 23.0,
      a -. b,
      345.66 ] ;

(* concaténation de vecteurs *)
u = c@z ;
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **map**




```
(* Function signature *)
fun f(i1:t1;...;iK:tK) returns (o1:tt1;...;oL:ttL)

(* Use of iterator *)
(o1,...,oL) = map<<N>> f(i1,...,iK) ;
```

Types de données structurées

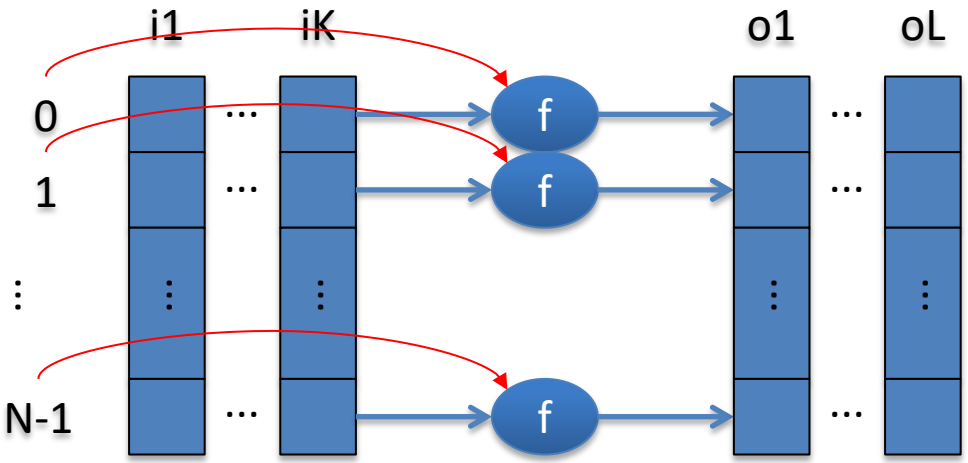
- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **map**

```
i1 = [20, 44, 10 ] ;
i2 = [13, 16, 77 ] ;
...
(* Calcule y[i] = f(i1[i],i2[i],i2[i]), i=0..2 *)
y = map<<3>> f (i1,i2,i2) ;
...
(* Calcule x[i] = i1[i]+i2[i] , i=0..2 *)
x = map<<3>> (+) (i1,i2) ;
...
(* Calcule (m[i],n[i]) = g(i1[i],y[i],x[i]) , i=0..2 *)
(m,n) = map<<3>> g (i1,y,x) ;
```

  - Taille du map et des vecteurs doivent être identiques
    - Approche "ceinture et bretelles"

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **mapi**




```
(* Function signature *)
fun f(i:int;i1:t1;...;iK:tK) returns (o1:tt1;...;oL:ttL)

(* Use of iterator *)
(o1,...,oL) = mapi<<N>> f(i1,...,iK) ;
```

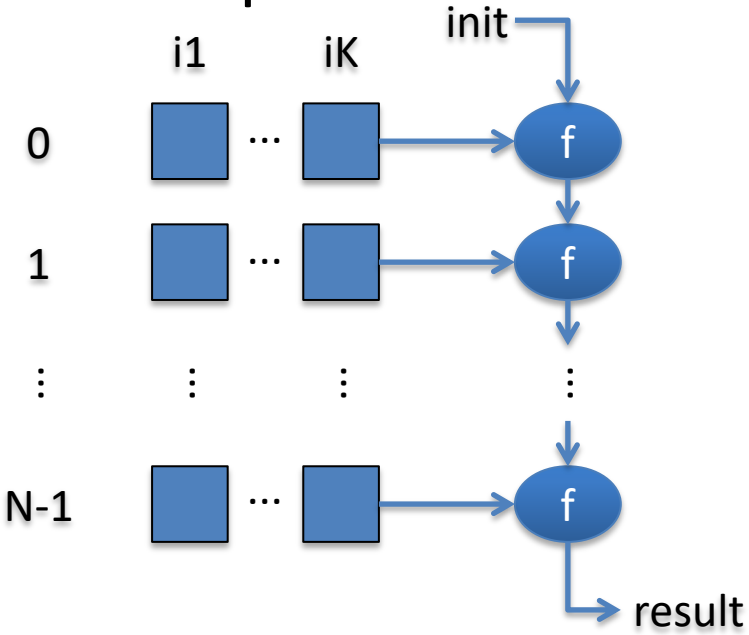
Types de données structurées

- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **mapi**

```
i1 = [20, 44, 10 ] ;
i2 = [13, 16, 77 ] ;
...
(* Calcule y[i] = ff(i,i1[i],i2[i],i2[i]) *)
y = mapi<<3>> ff (i1,i2,i2) ;
...
(* Calcule x[i] = i+i2[i] *)
x = mapi<<3>> (+) (i2) ;
...
(* Calcule (m[i],n[i]) = gg(i,i1[i],y[i],x[i]) *)
(m,n) = mapi<<3>> gg (i1,y,x) ;
...
fun h(x:int) returns (y:int) let y = x tel
...
z = mapi<<3>> h () ; (* combien vaudra z ? *)
```

Types de données structurées

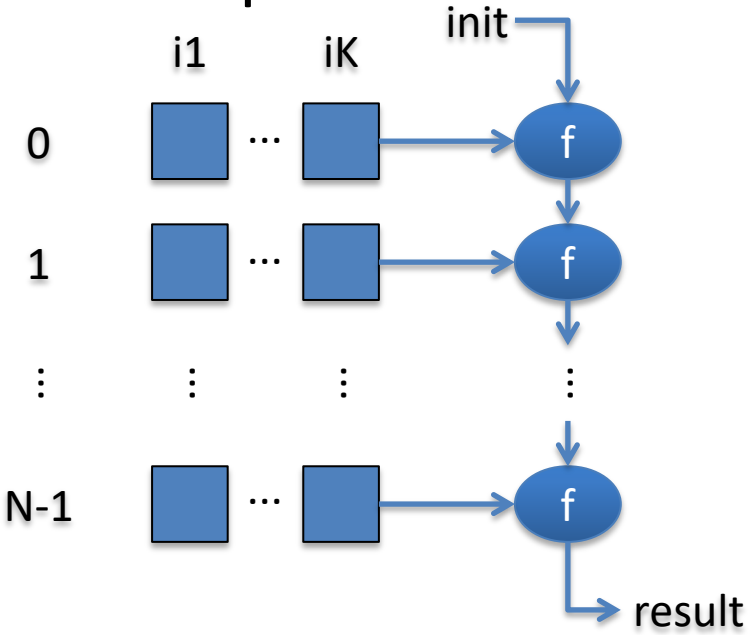
- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **fold**




```
(* prototype de f *)
fun f(i1:t1;...;iK:tK;acc:t) returns (res:t)
(* Application *)
r = fold<<N>> f (i1,...,iK,init) ;
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **fold**

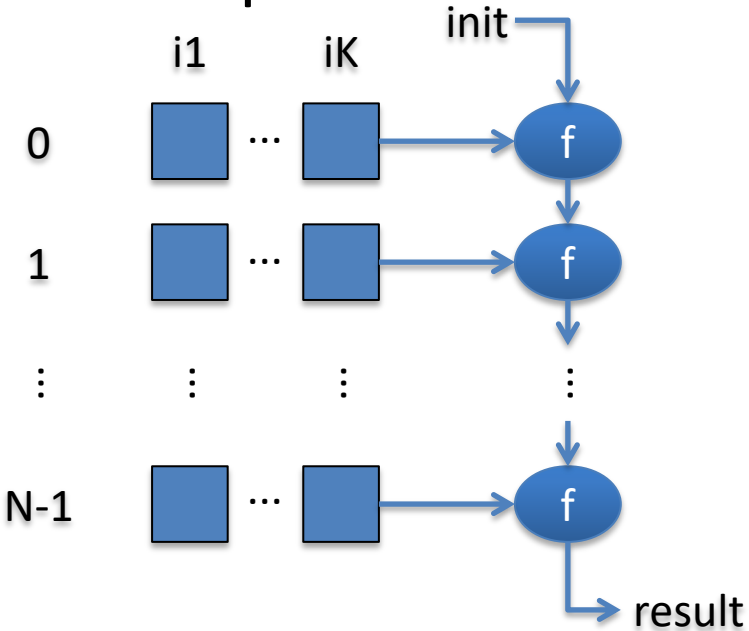



```
y = [0, 1, 2] ;
(* Calcule z = mf(y[2],
                  mf(y[1],
                     mf(y[0],123)
                  )
               ) *)
z = fold<<3>> mf (y,123) ;
```

```
(* prototype de f *)
fun f(i1:t1;...;iK:tK;acc:t) returns (res:t)
(* Application *)
r = fold<<N>> f (i1,...,iK,init) ;
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **fold**



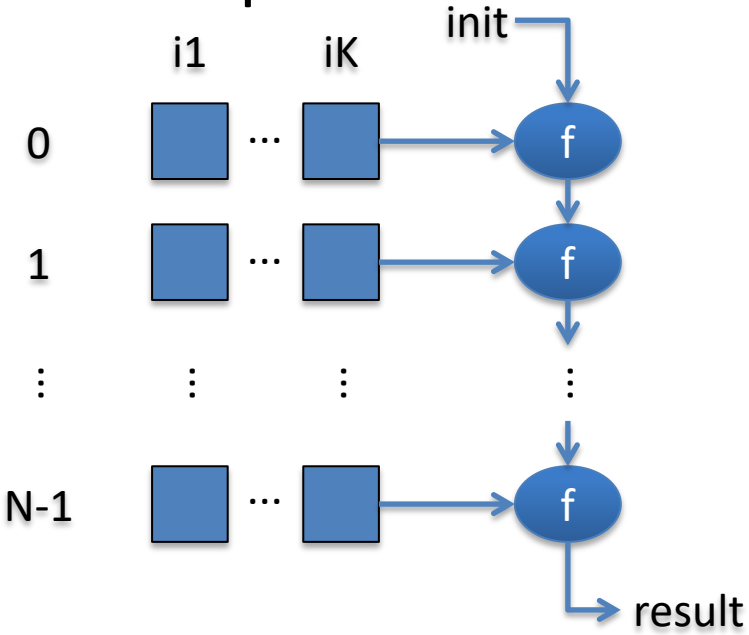

```
y = [0, 1, 2] ;
(* Calcule z = mf(y[2],
                  mf(y[1],
                     mf(y[0],123)
                  )
               ) *)
z = fold<<3>> mf (y,123) ;

(* Exercice : Que calcule la
   ligne suivante ? *)
x = fold<<3>> (+) (y,0) ;
```

```
(* prototype de f *)
fun f(i1:t1;...;iK:tK;acc:t) returns (res:t)
(* Application *)
r = fold<<N>> f (i1,...,iK,init) ;
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **fold**

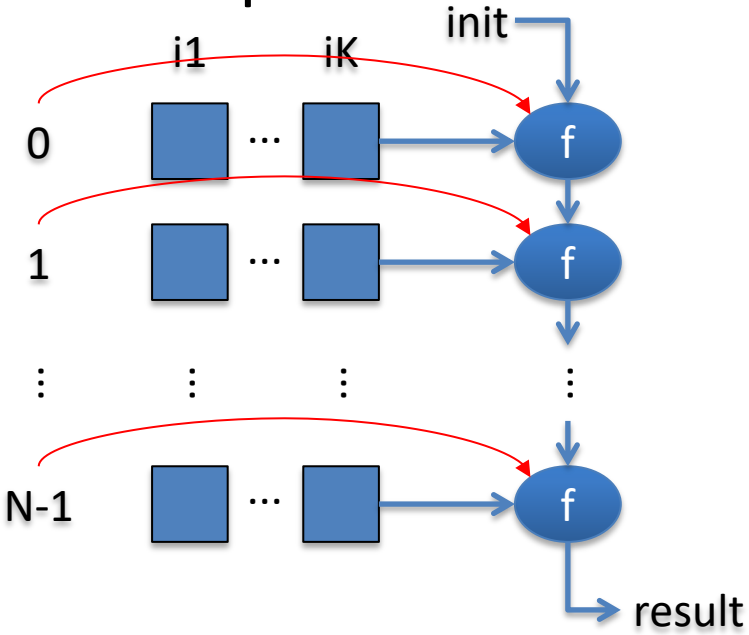



```
fun max(x:int;y:int) returns (o:int)
let
  o = if x<=y then y else x ;
tel

fun maxv<<n:int>>(x:int^n)
   returns (o:int)
let
  o = fold<<n>> max (x,x[0]) ;
tel
```

Types de données structurées

- Vecteurs
  - Manipulation de vecteurs : itérateur **foldi**




```
y = [0, 1, 2] ;
(* Calcule z = mf(2,y[2],
                  mf(1,y[1],
                     mf(0,y[0],123)
                  )
               ) *)
z = foldi<<3>> mf (y,123) ;
```

```
(* prototype de f *)
fun f(i:int;i1:t1;...;iK:tK;acc:t) returns (res:t)
(* Application *)
r = foldi<<N>> f (i1,...,iK,init) ;
```

Paramètres statiques

- Une fonction ou un noeud peut avoir des paramètres statiques
  - Ne changent pas entre les appels successifs d'un noeud
  - Spécifient : tailles de tableaux, constantes

```
node addvector<<m:int>>(a:int^m;b:int^m) returns (o:int^m)
let
  o =map<<m>> (+)(a, b);
tel
```

  - Un paramètre statique ne peut pas dépendre d'un autre

```
node bad<<m:int;b:int^m>>(a:int^m) returns (o:int^m)
let
  o =map<<m>> (+)(a, b);
tel
```

Paramètres statiques

- Un vecteur peut avoir la taille définie avec :
  - Une constante nommée (globale)
  - Un paramètre statique du noeud
- Compilation
  - Si un noeud paramétrique d'un fichier abc.ept est utilisé dans un fichier def.ept:

```
heptc –c abc.ept (* builds .epo intermediate representation *)
heptc –target c def.ept
```

Contenu

- Comment construit-on une spécification fonctionnelle ?
  - Cas d'étude GNC (avionique aérospatiale)
  - Programmation de GNC
- Programmation Heptagon
  - Types de données structurés
  - Paramètres statiques
- Préparation du TP
  - Programmation de l’exemple GNC

Objectif 1 – programmation de GNC

- Programmer GNC (transparent 22)
- Les tâches Fast, GNC, Thermal
  - Chaque tâche est un noeud programmé en Heptagon dont l'état est formé d'un seul compteur d'instances idx, incrémenté (en Heptagon) à chaque exécution
    - Un compteur par tâche
  - La fonction calculée par GNC est x = y-idx, la fonction calculée par Fast est y = 2*x + idx
  - Chaque instance d'un noeud doit imprimer : le nom du noeud, la valeur d'idx, et (pour GNC et Fast) les valeurs d'entrée et de sortie
    - Fonctions externes d' impression à écrire en C et interfacer .epi
- Utiliser usleep pour assurer que chaque cycle d'exécution a une durée d'au moins 1 seconde (au lieu de 100ms)
  - Comme pour l'exemple "counter" du TP1

Objectif 1 – programmation de GNC

- Attention – la fonction thermal n'a pas d'entrées, ni de sorties, donc la programmation de « condact_thermal » ne suit pas le schéma normal
  - Un nœud supplémentaire avec entrée inutile est nécessaire