

# Conception de systèmes embarqués temps réel

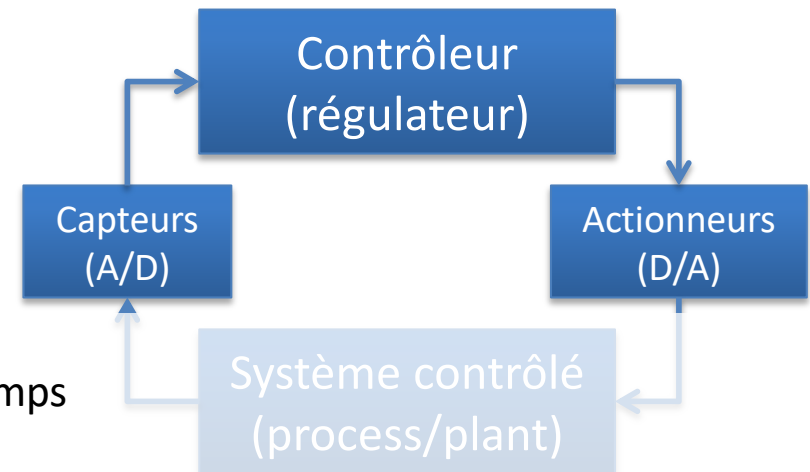
Dumitru Potop-Butucaru  
dumitru.potop@inria.fr  
cours EPITA, 2025

# 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

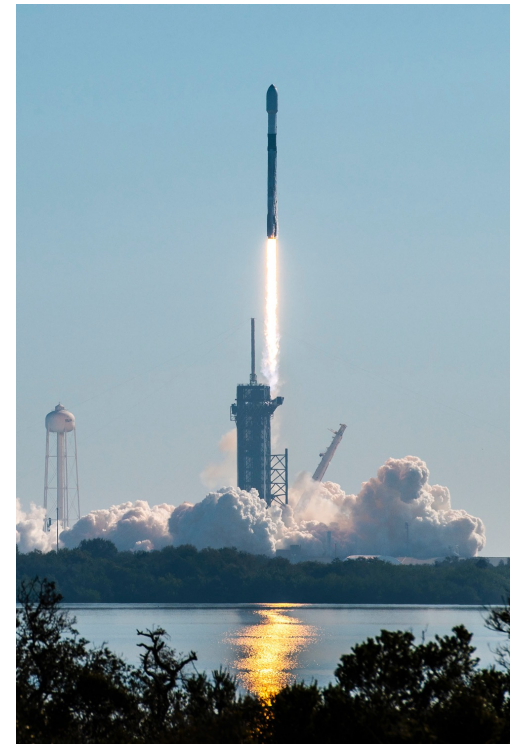
# Spécification d'un contrôleur

- 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)



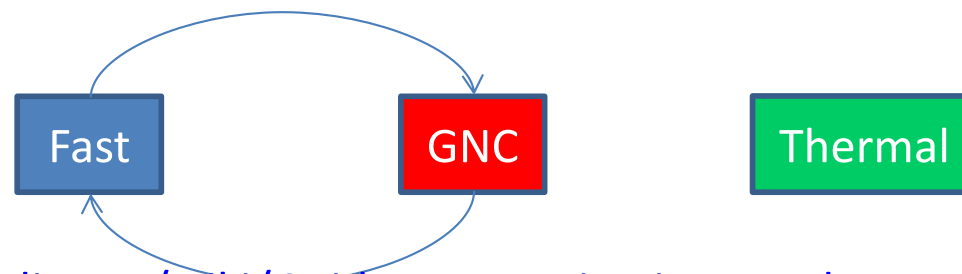
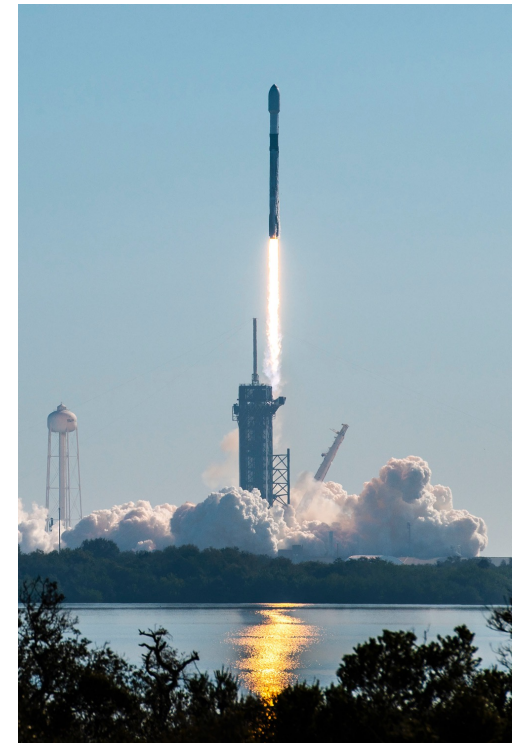
# Exemple GNC

- Guidance, Navigation, and Control
  - Guidance = choix de la trajectoire
  - Navigation = identification de la position, de la vitesse, de l'orientation du lanceur
  - Control = choix de la puissance des moteurs et de leur orientation (et de celle des surfaces de contrôle) en fonction des valeurs venant de Navigation pour atteindre les objectifs fixés par Guidance.
- Lanceurs spatiaux, drones
  - Fonctions qui ne peuvent pas être déléguées à un humain
    - La communication est parfois interrompue



# Exemple GNC

- 3 tâches Fast, GNC, Thermal
  - Fast et GNC communiquent
  - GNC = calculs lourds (lents)
  - Fast = calculs légers à faible latence (capteurs et actionneurs)
  - Thermal = contrôle thermique de la fusée



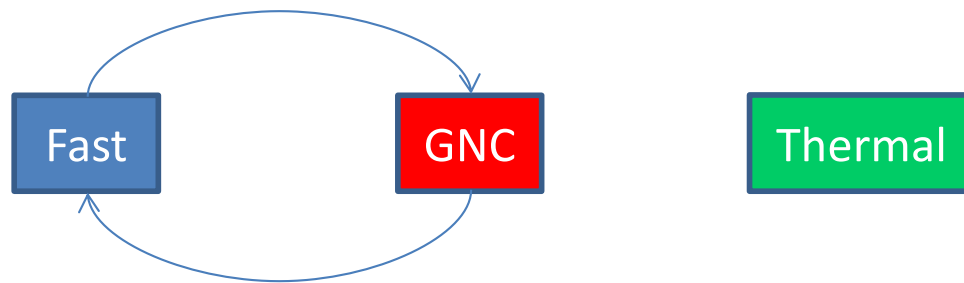
[https://en.wikipedia.org/wiki/Guidance,\\_navigation,\\_and\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/Guidance,_navigation,_and_control)

<http://manuscript.elsevier.com/S0094576515003811/pdf/S0094576515003811.pdf>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft\\_thermal\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_thermal_control)

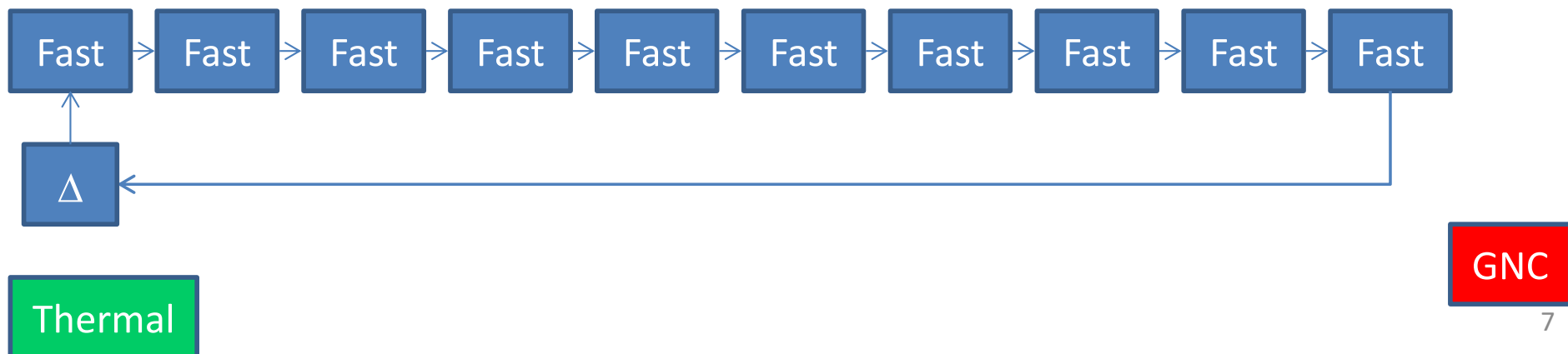
# Exemple GNC

- 3 tâches Fast, GNC, Thermal
  - Fast et GNC communiquent
- Perodes (simplifié): 100ms, 1s, 1s



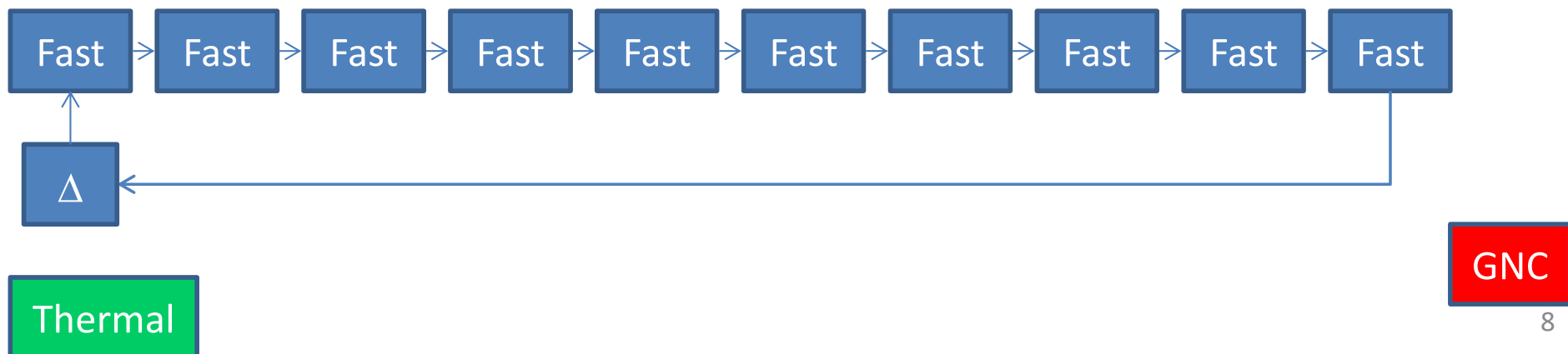
# Exemple GNC

- Perodes: 100ms, 1s, 1s
  - Déclenchement déterministe des tâches désiré
    - Hyper-période = PPCM(périodes des tâches) = 1s
      - Chaque seconde : 10 instances de Fast, une de GNC et une de Thermal
      - Ce sera notre cycle de spécification
      - C'est un **choix de conception**



# Exemple GNC

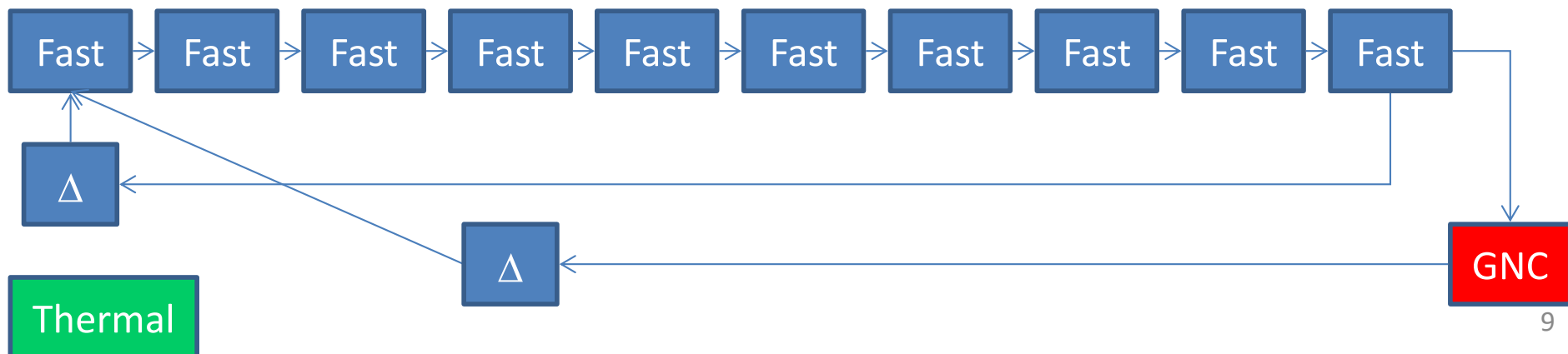
- Perodes: 100ms, 1s, 1s
  - Déclenchement déterministe des tâches désiré
    - Hyper-période = PPCM(périodes des tâches)
  - Fast, GNC, Thermal non-synchronisés au niveau de la spécification donnée par l'automaticien
    - Motif de communication déterministe désiré





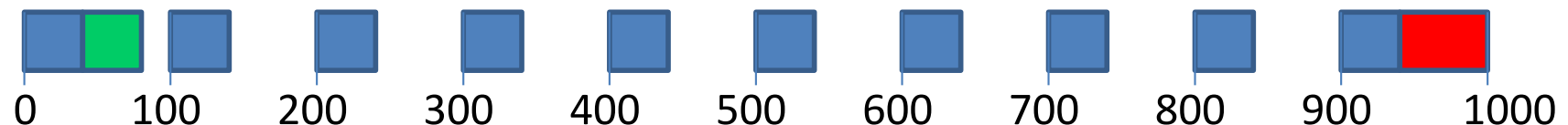
# Exemple GNC

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



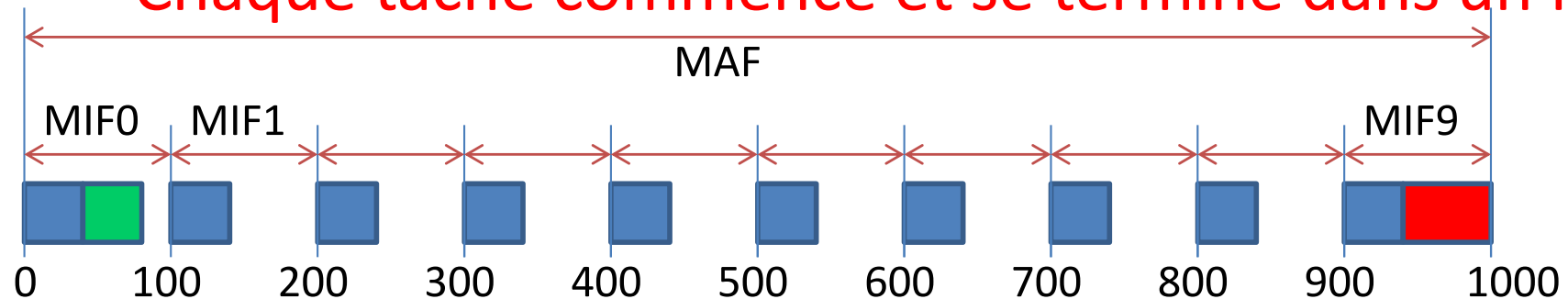
# Exemple GNC

- Choix d'implantation classique :
  - Single-core
  - Ordonnancement temps réel "time-triggered"
    - Hypothèse : WCETs: 40ms, 60ms et 40ms
    - Déclenchements sur barrière de 100ms (timer)



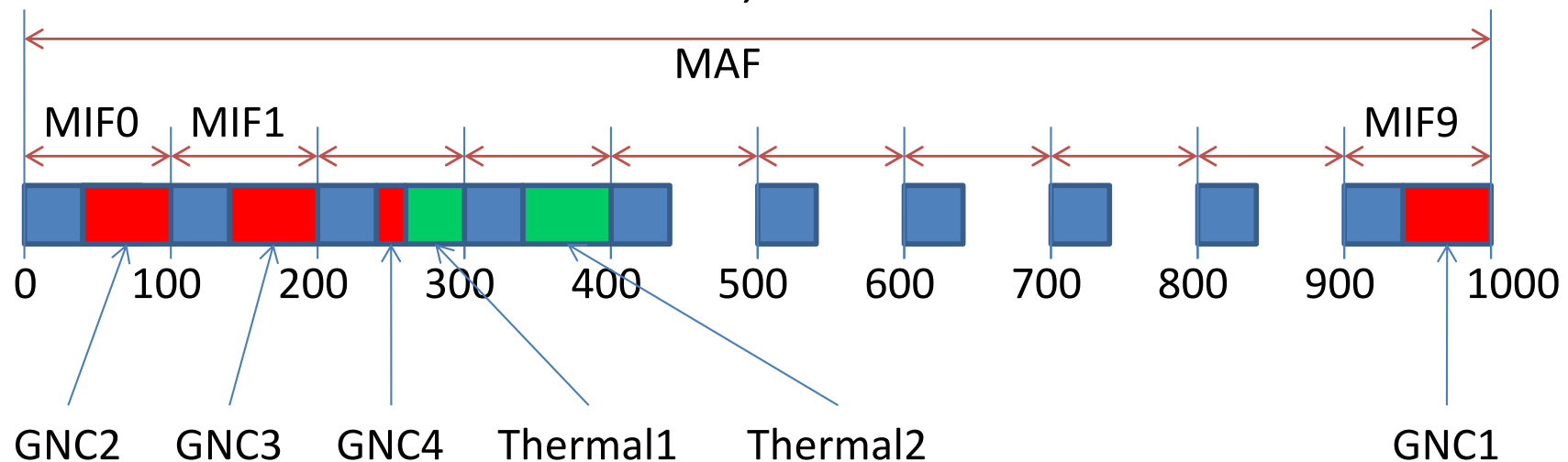
# Exemple GNC

- 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



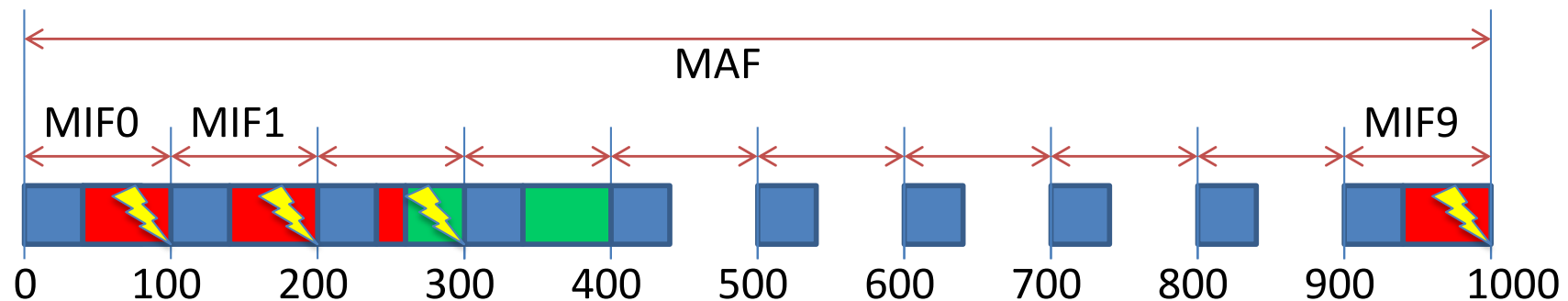
# Exemple GNC

- 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



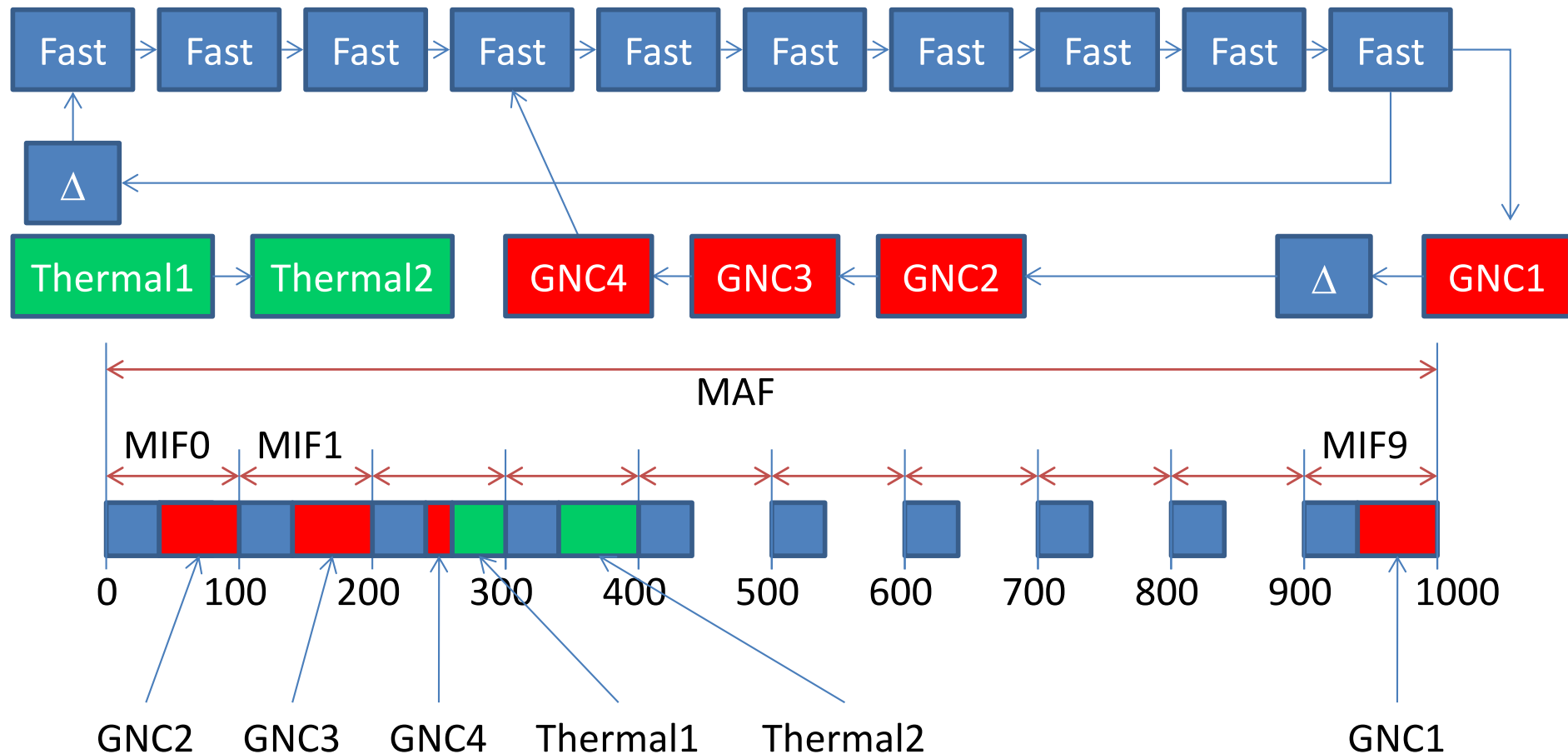
# Exemple GNC

- 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)



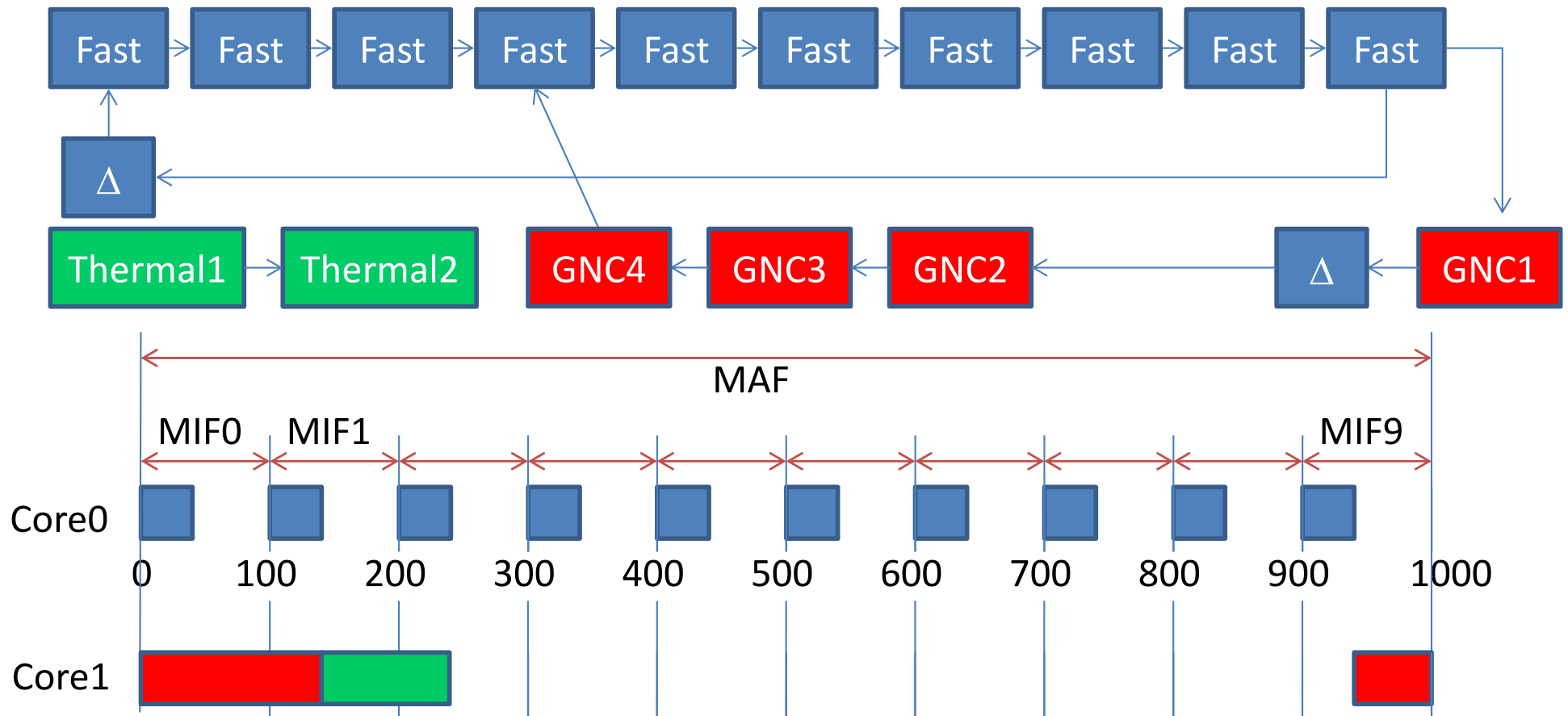
# Exemple GNC

- Attention : la fonction change !



# Exemple GNC

- Exécution sur un dual-core



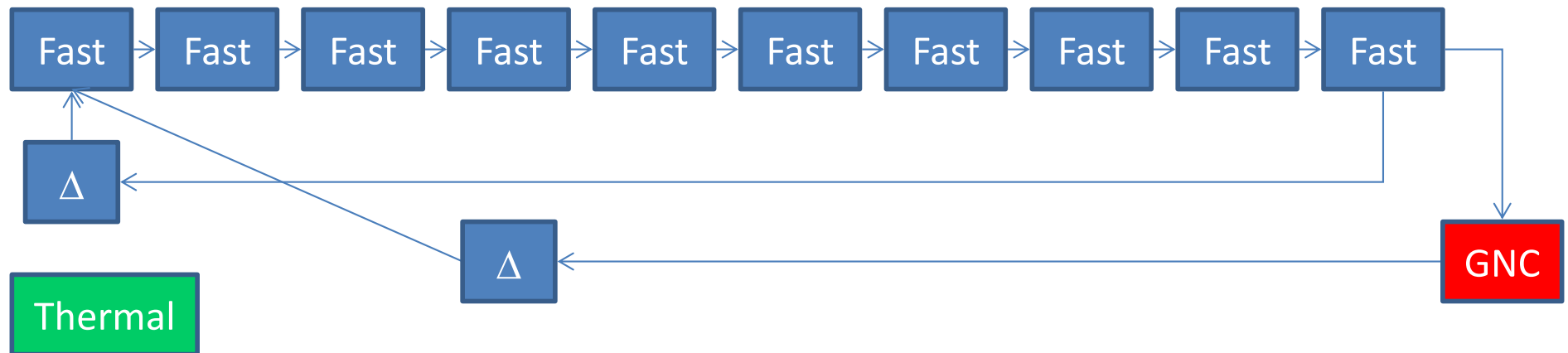
# Exemple GNC

- A retenir :
  - La spécification automatique laisse des degrés de liberté -> non-déterminisme
  - Le déterminisme est souhaité dans l'implantation
    - Choix de design à faire pour déterminer
  - Ces choix peuvent être contraints par divers facteurs, comme la durée des tâches
    - Complexité SW, matériel, choix OS, choix de mise en œuvre
- Et maintenant, passons à la programmation de l'exemple

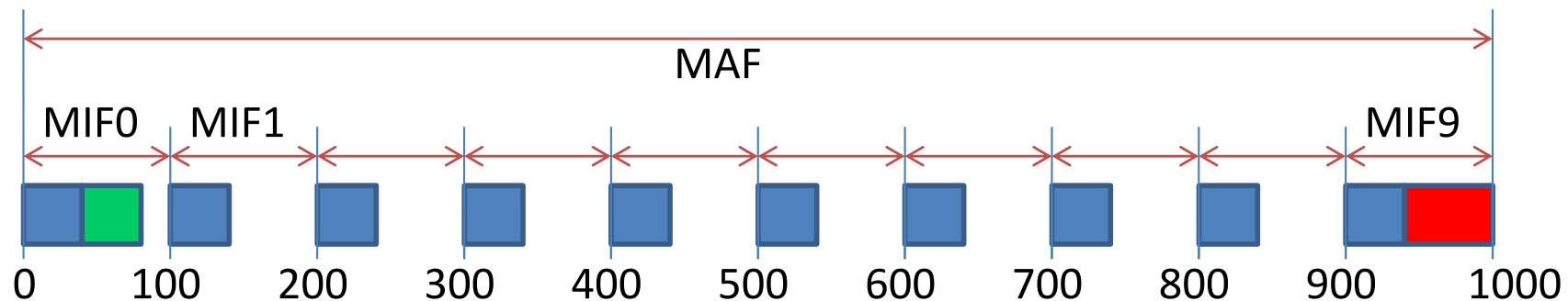


# Programmation de l'exemple GNC

- Fonctionnalité (déterministe)

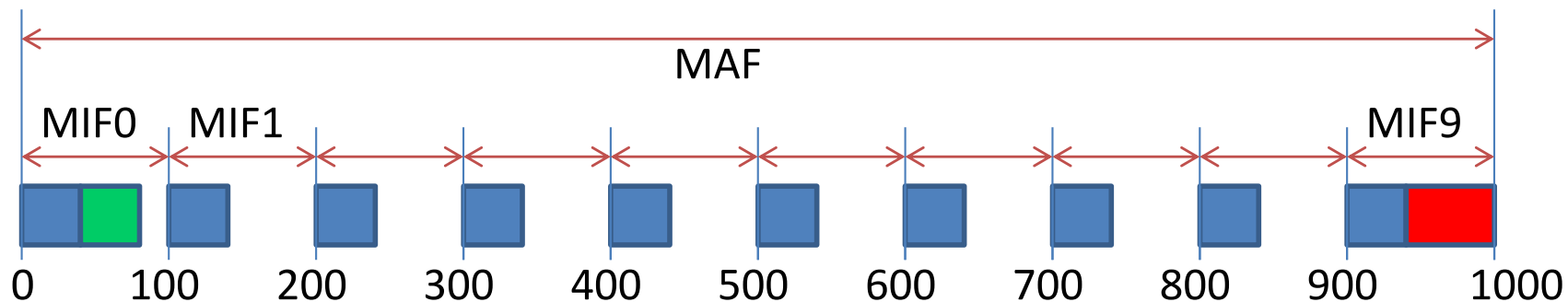


- Implémentation désirée – type MIF/MAF



# Programmation de l'exemple GNC

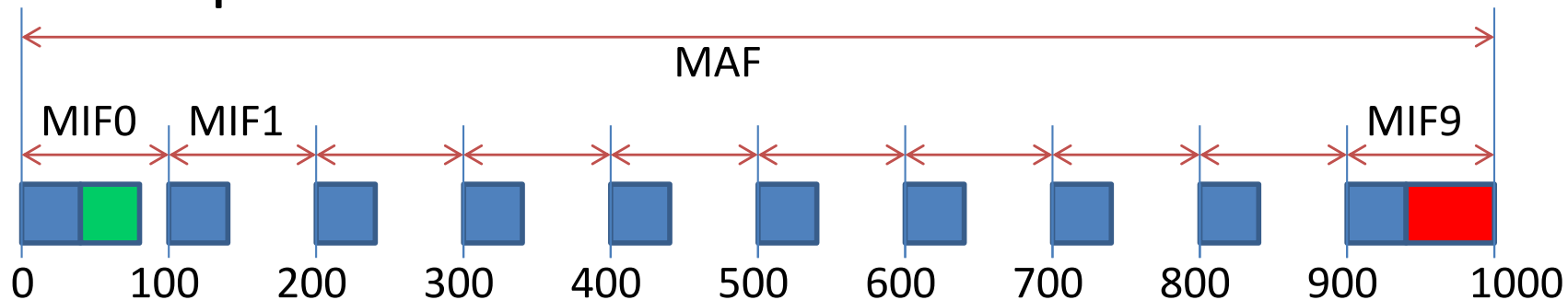
- Programme Heptagon
  - Un cycle du programme synchrone = un MIF
    - Code résultant de la compilation à appeler à chaque MIF
      - Solution complète pour le cas séquentiel
      - Pour du code parallèle, le problème de parallélisation reste non-résolu
    - L'affectation des tâches aux MIFs est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



# Programmation de l'exemple GNC

- Conditions d'activation (\* Clock computation \*)
  - MIF modulo counter

```
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

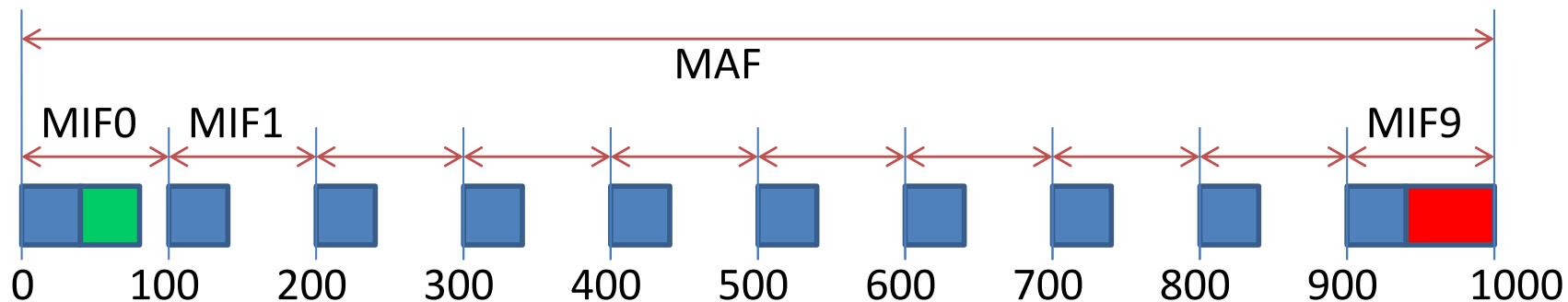


# Programmation de l'exemple GNC

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

```
node conduct_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
```

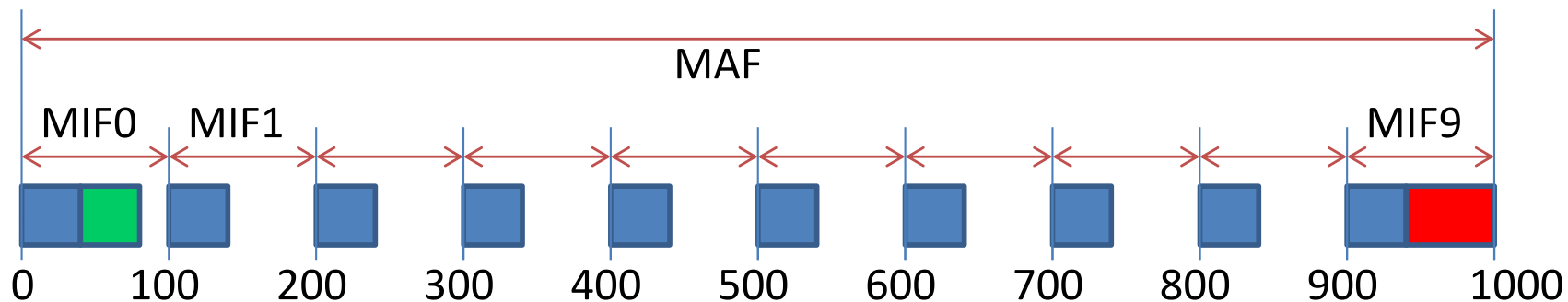
Paramètre statique



# Programmation de l'exemple GNC

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

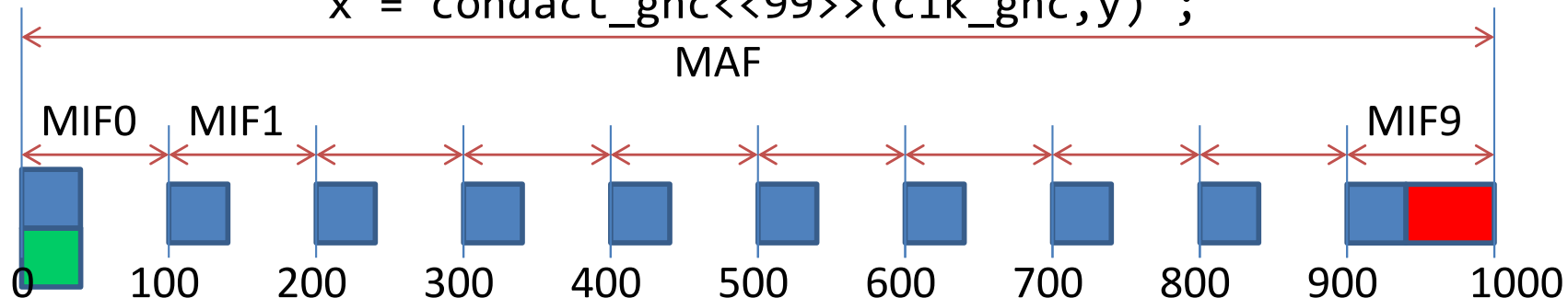
cycle	0	1	2	3	4	5	...
y	10	7	21	3	4	1	...
c	f	t	f	t	f	t	...
gnc(y when c)		v1		v2		v3	...
conduct_gnc<<99>>(c,y)	99	v1	v1	v2	v2	v3	...



# Programmation de l'exemple GNC

- Flot de données global

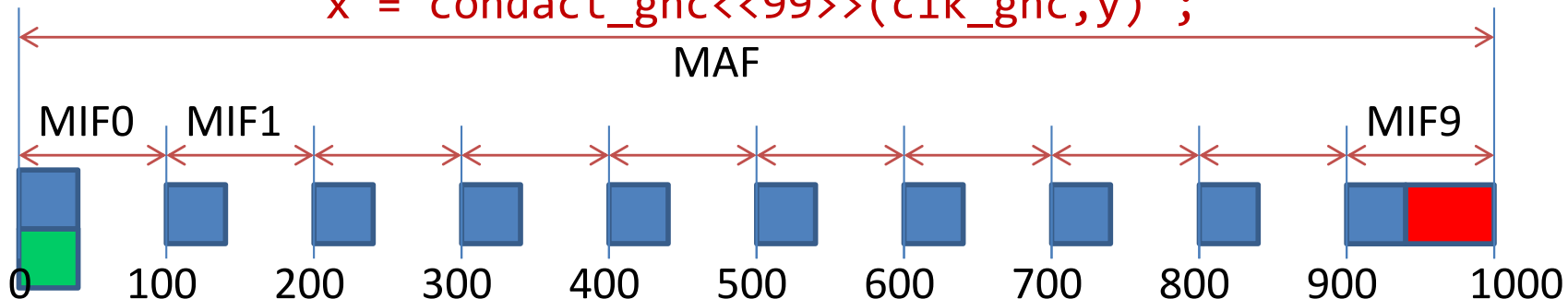
```
(* Clock computation *)  
mif_cnt = 0 fby ((mif_cnt+1)%10) ;  
clk_f = true ;  
clk_thermal = (mif_cnt = 0) ;  
clk_gnc = (mif_cnt = 9) ;  
(* Flot de données *)  
y = conduct_f<<31>>(clk_f,x) ;  
( )= conduct_thermal(true when clk_thermal) ;  
x = conduct_gnc<<99>>(clk_gnc,y) ;
```



# Programmation de l'exemple GNC

- Flot de données global – dépendance cyclique

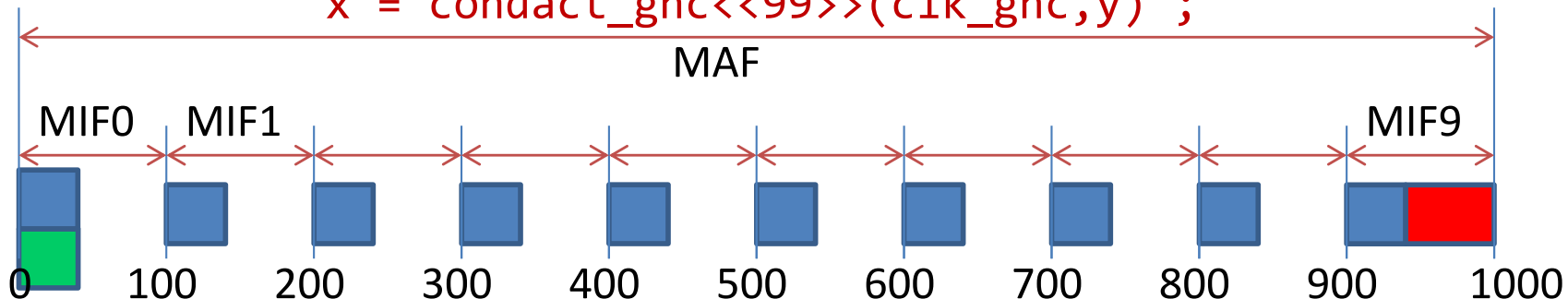
```
(* Clock computation *)  
mif_cnt = 0 fby ((mif_cnt+1)%10) ;  
clk_f = true ;  
clk_thermal = (mif_cnt = 0) ;  
clk_gnc = (mif_cnt = 9) ;  
(* Flot de données *)  
y = conduct_f<<31>>(clk_f,x) ;  
( )= conduct_thermal(true when clk_thermal) ;  
x = conduct_gnc<<99>>(clk_gnc,y) ;
```



# 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 = conduct_f<<31>>(clk_f,99 fby x) ;  
( )= conduct_thermal(true when clk_thermal) ;  
x = conduct_gnc<<99>>(clk_gnc,y) ;
```

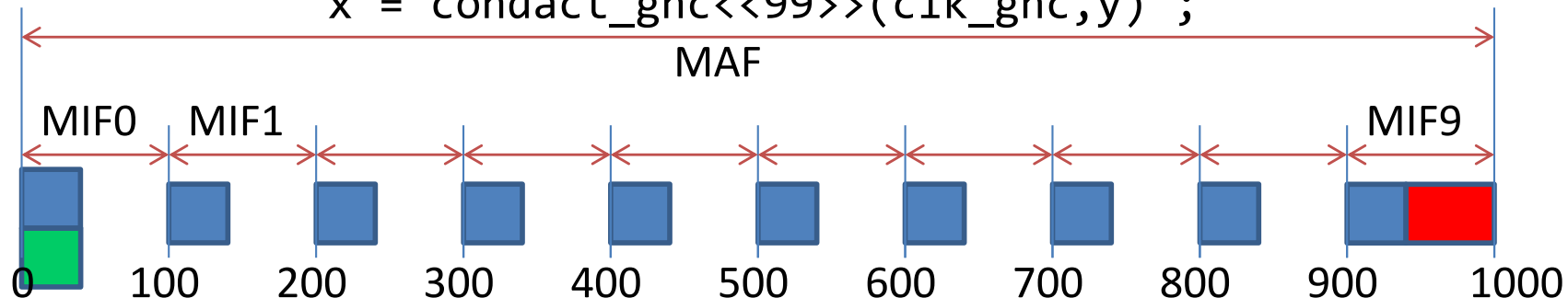




# Programmation de l'exemple GNC

- Activation conditionnelle de Thermal
  - Cf. cours 2, transparent 46

```
(* 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 = conduct_f<<31>>(clk_f,99 fby x) ;  
()= conduct_thermal(true when clk_thermal) ;  
x = conduct_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 = conduct_f<<31>>(clk_f,99 fby x) ;
  ()= conduct_thermal(true when clk_thermal) ;
  x = conduct_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 déclaration 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 déclaration 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 vecteur31*/
```

# 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 erroné, 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 erroné,  
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 } ]
```

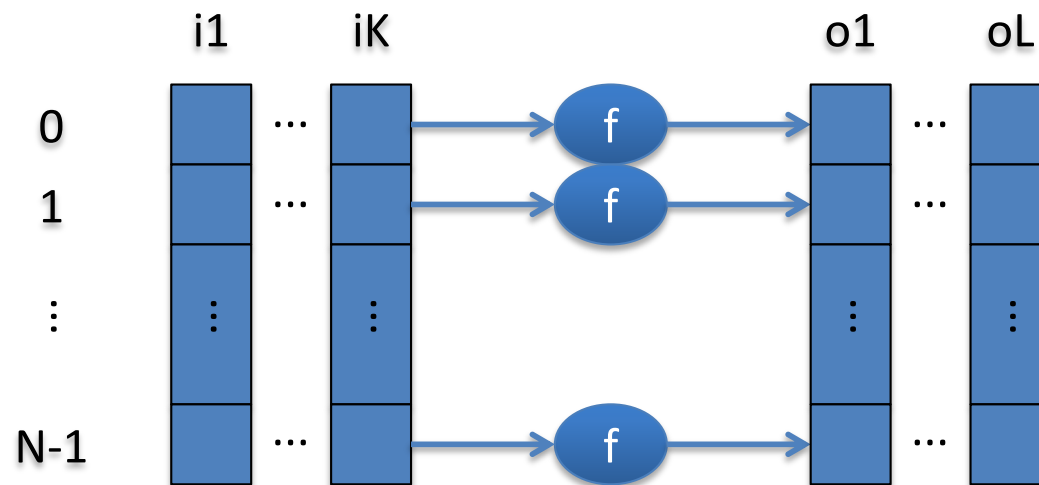
```
(* attention aux opérations sur flottants *)  
y = [ (c[1]).re +. 23.0,  
      a -. b,  
      345.66 ] ;
```

```
(* 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**

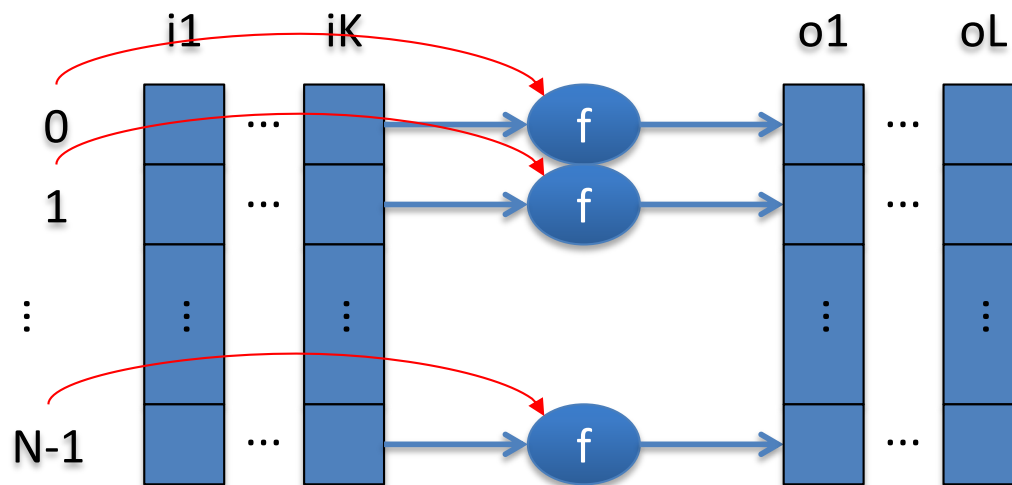
```
i1 = [20, 44, 10 ] ;  
i2 = [13, 16, 77 ] ;  
...  
(* Calcule y[i] = f(i1[i],i2[i],i2[i]), i=0..2 *)  
y = map<<3>> f (i1,i2,i2) ;  
...  
(* Calcule x[i] = i1[i]+i2[i] , i=0..2 *)  
x = map<<3>> (+) (i1,i2) ;  
...  
(* Calcule (m[i],n[i]) = g(i1[i],y[i],x[i]) , i=0..2 *)  
(m,n) = map<<3>> g (i1,y,x)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

- 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

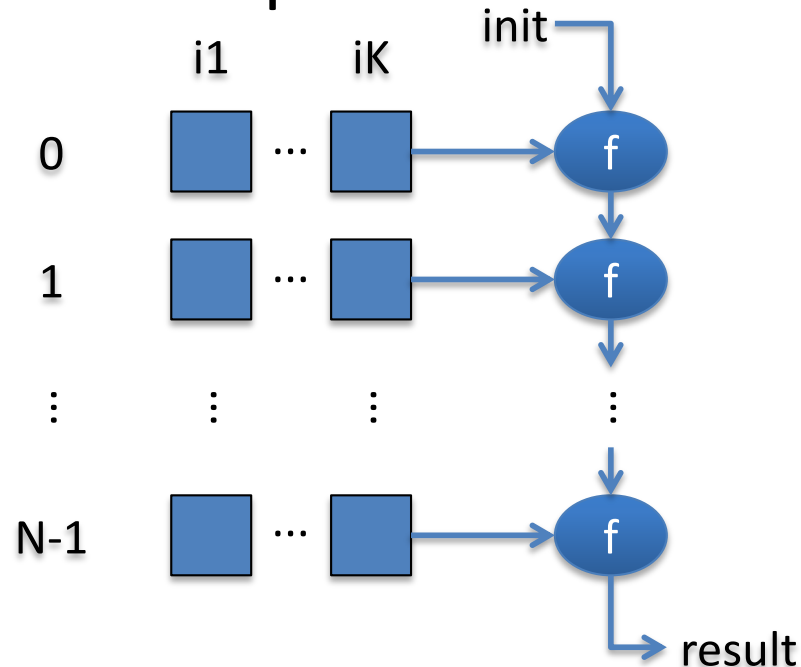
- Manipulation de vecteurs : itérateur **mapi**

```
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**

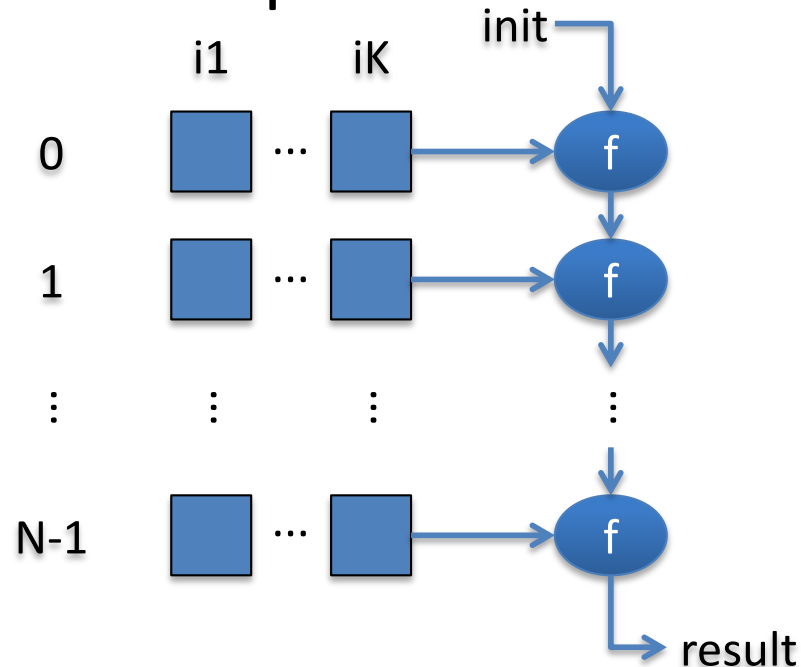


```
(* prototype de f *)  
fun f(i1:t1;...;iK:tK;acc:t) returns (res:t)  
(* Application *)  
r = fold<<N>> f (i1,...,iK,init) ;
```

# 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) ;
    
```

```

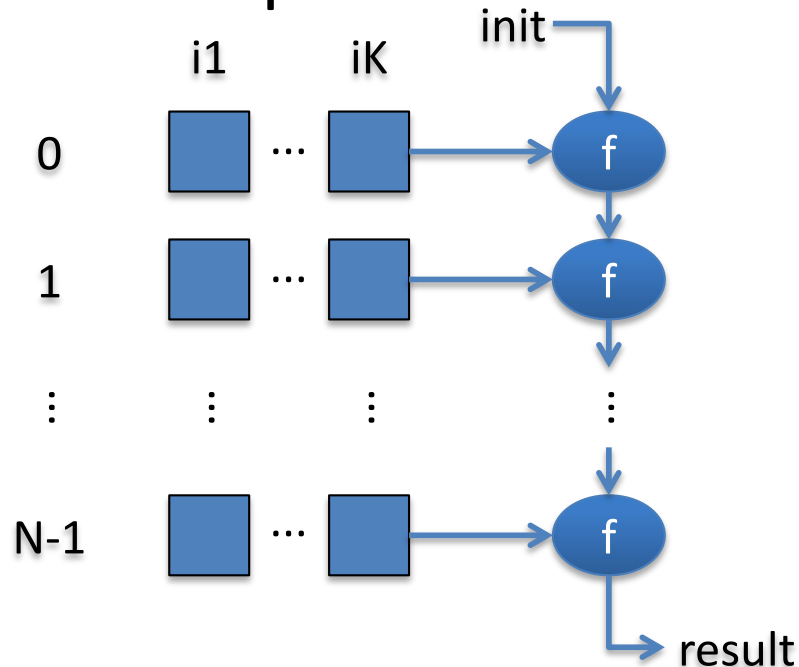
(* prototype de f *)
fun f(i1:t1;...;iK:tK;acc:t) returns (res:t)
(* Application *)
r = fold<<N>> f (i1,...,iK,init) ;
    
```



# 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) ;
```

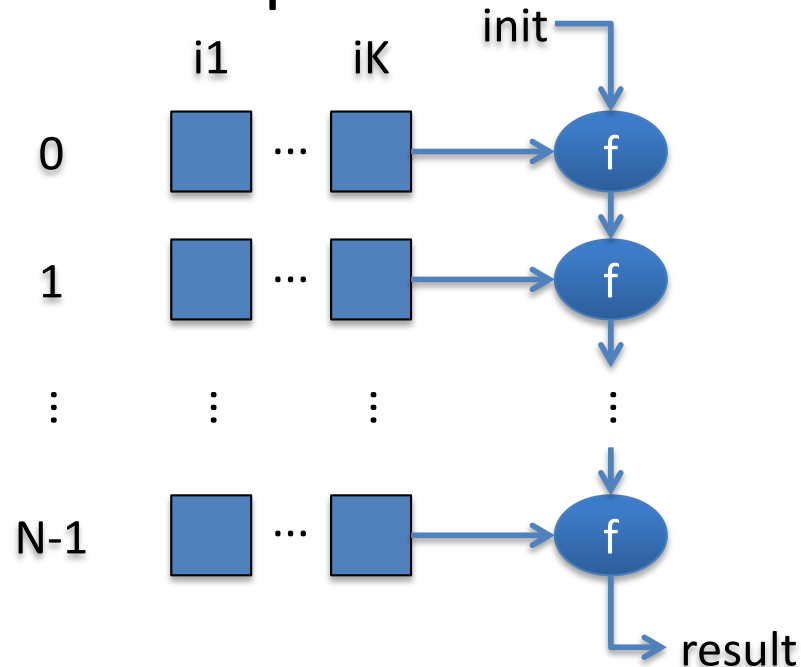
```
(* Exercice : Que calcule la  
   ligne suivante ? *)  
x = fold<<3>> (+) (y,0) ;
```

```
(* 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**



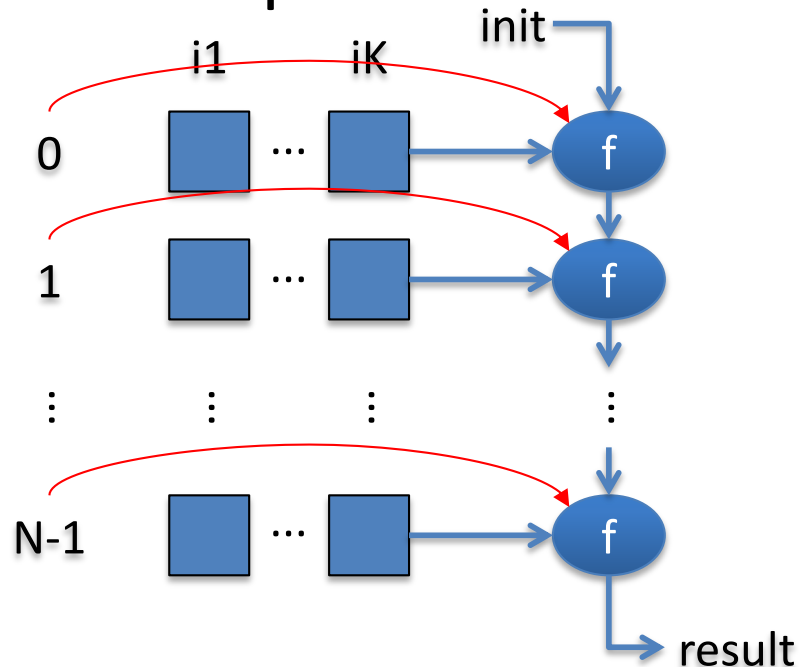
```
fun max(x:int;y:int) returns (o:int)
let
  o = if x<=y then y else x ;
tel

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
```

# 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 fp<<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
```

# 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 26)
- 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
  - La fonction calculée par GNC est  $x = y - idx_{GNC}$ , la fonction calculée par Fast est  $y = 2 * x + idx_{Fast}$
  - 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 « conduct\_thermal » ne suit pas le schéma normal
  - Un nœud supplémentaire avec entrée inutile est nécessaire (expliqué en Cours 2, transparents 45-46)