UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

LIP6

Langages synchrones

Lustre

Emmanuelle Encrenaz

(emmanuelle.encrenaz@lip6.fr)

Sept. 2018

Master d'Informatique
Spécialité SAR
Langages Synchrones

Langages de flots de données

- **Les systèmes réactifs sont apparus à l'origine en automatique, en traitement du signal et conception de circuits**
  - **Formalisme équationnel : équations différentielles, équations aux différences finies**
  - **Formalisme diagrammatique : schémas blocs, schémas analogiques**

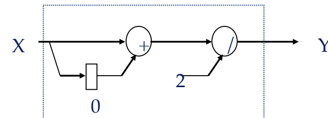
  - **Réseau de Khan, Lucid : langages flots de données asynchrones**
  - **Matlab, simulink, VHDL-AMS**

- **Modèle data-flow**
  - ***flots*** **: suite infinie de valeurs, chaque flot est caractérisé par son équation (définition, propriété)**
  - **Schéma opératif pré-établi. Chaque nœud opérateur est activé par l'apparition de nouvelles entrées**

Langages de flots de données (2)

- **Caractéristiques**
  - **Parallélisme à grain fin (niveau opérateur)**
  - **Modèle fonctionnel :**
    - *Calcul vu comme une composition de fonctions*
    - *Pas de notion de mémoire, d'affectation, d'effet de bord*
  - **Représentation graphique du réseau d'opérateurs**
    - *Décomposition hiérarchique*

- **Exemple : filtre de convolution (traitement du signal)**
  - $Y_1 = X_1/2$, $Y_n=(X_n+X_{n-1})/2$



Lustre

- **Lustre :**
  - **Langage flot de données :**
    - *Parallélisme grain fin, hiérarchie*
  - **Fonctionnel, déclaratif,**
    - *Composition et substitution*
  - **Synchrone :**
    - *Simultanéité des réactions, infiniment rapides, déterministe*

- **Comportement cyclique → *horloge de base***

- **Génération automatique de code impératif (simulation / vérification)**

Exemple

- **Syntaxe Lustre du filtre de convolution**

```
node convolution (X:real) returns (Y:real);
let Y = (X + (0.0 -> pre X)) / 2.0;
tel;
```

- **Autre écriture**

```
node convolution (X:real) returns (Y:real);
var pY: real;
let  Y = (X + pY) / 2.0;
     pY = 0.0 -> pre X;
tel;
```

- **Un programme Lustre = un ensemble d'équations de flots,**
  - **ordre sans importance**
  - **synchronisme de l'automatique (index = temps)**

Flots et horloges

- **Flot : Séquence infinie de valeurs typées, associée à une horloge**
  - **Flot sur `V` : V^∞**
  - **Ex : flot constant** `C = 1,1,1,1, …`
  - **Ex :** `F = 1,2,1,1,3,78, -256, 170, …`
- **Horloge : Flot booléen =** $\{true, false\}^\infty$
  - **Horloge H : la suite des instants où H vaut true**
  - **Horloge de base (tick) :** $\{true\}^\infty$
  - F = $(f_i)_{i \in IN}$: fi représente la valeur de F au i-ème instant de son horloge
  - **Ex :** `H  = true, false, false, true, false, true, true, true,`
- **Définition de nouvelles horloges par sous-échantillonnage**
  - *Arbre d'horloge de racine l'horloge de base*
  - *Permet d'indiquer l'absence de valeur dans un flot*
  - *Ex :* `F when H = 1,(abs),(abs),1,(abs),78, -256, 170, …`

Structure d'un programme Lustre

- **Une suite de déclarations de nœuds :**

```
node ID_NODE ([ID_IN : ID_TY_IN]*)
          returns ([ID_OUT : ID_TY_OUT]*);

   var [(ID_VAR : ID_TY_VAR) [when ID_HORLOGE]]*;

   Let
     ID_VAR1 = expression_1;
     ID_VAR2 = expression_2;
     …
     assert (expression_p);
     assert (expression_q);

   tel;
```

Déclaration interface du nœud (evt. sous-échantillonnées)

Déclaration variables internes (evt. sous-échantillonnées)

Équation : définition unique et non ambiguë d'une variable interne ou de sortie

Assertion : expression booléenne présupposée vraie à tout instant

- **Principes de *déclaration* et de *substitution***
- **Types de base :**
  - `int, bool, real,`
  - **constructeur de tuple, extensions : tableaux**
  - **types importés du langage hôte**

Expressions sur les flots

- **Expressions**
  - **Définition de flots et d'horloges**
  - **Baties sur : flots constants, variables de flots, opérateurs, instanciation de nœuds**
- **Opérateurs combinatoires**
  - **Flots constants**
  - **Opérations n-aires, éventuellement importées du langage hôte**
  - **Alternative**
- **Opérateurs temporels**
  - **Prédécesseur**
  - **Valeur initiale**
  - **Sous- et sur- échantillonnage**
- **Instanciation de nœuds précédemment déclarés**
  - **Chaque instanciation crée un nouveau calcul**

Opérateurs combinatoires

- **Flot**
  - Séquence de valeurs sur V : $F = (f_i)_{i \in IN}$ et $\forall i \in IN, f_i \in V$
  - Flot constant K : $K = (k_i)_{i \in IN}$ et $\forall i,j \in IN, k_i, k_j \in V$ et $k_i = k_j$,
- **Opérations n-aires (importées) (e.g. `+`, `*`, `not`, `and`, …)**
  - Application ponctuelle : opérandes et résultat sur la même horloge
  - Soient op : $V^n \rightarrow V$
    et n flots $F_1, \dots F_n$ avec $F_i = (f_{il})_{l \in IN}$
    on définit $op(F_1, \dots F_n) = (f_{1l}\ op\ f_{2l} \dots op\ f_{nl})_{l \in IN}$
- **Alternative `R = if cond then F1 else F2`**
  - Application ponctuelle : `cond`, F_1, F_2 et résultat sur la même horloge,
  - `cond` flot booléen, F_1 et F_2 flots de même type
  - Soient $cond = (c_i)_{i \in IN}$, $F_1 = (f_{1i})_{i \in IN}$, $F_2 = (f_{2i})_{i \in IN}$,
    on définit $R = (r_i)_{i \in IN}$ tq $r_i = f_{1i}$ si c_i = `true`, $r_i = f_{2i}$ si c_i = `false`

Opérateurs combinatoires

flot	valeur au 1er tick	valeur au 2e tick	valeur au 3e tick	valeur au 4e tick
1	1	1	1	1
C	true	true	false	true
X	x_1	x_2	x_3	x_4
Y	y_1	y_2	y_3	y_4
X op Y				
If C then X else Y				

Liste des opérateurs combinatoires

- **Opérateurs booléens**
  - `and , or , xor , not , #`
  - **T = #(X,Y,…) défini tel que**
    X,Y, … T : flots booléens
    $T = (t_i)_{i \in IN}$ / t_i = `true` ssi au plus 1 parmi x_i, y_i, … vaut `true`
- **Alternative**
  - `if … then … else`
- **Opérateurs arithmétiques (entiers et réels)**
  - `+ , - , * , / , div , mod`
- **Comparaison**
  - `= , <> , < , <= , > , >=`
- **Conversion de type**
  - `int , real`

Opérateurs temporels (1)

- **Délais (pre)**
  - Soit $F = (f_i)_{i \in IN}$, F' = pre(F) de même horloge que F et défini tel que :
  - $F' = (f'_i)_{i \in IN}$ et f'_1 = nil,
    $f'_i = f_{i-1}\ \forall i > 1$
- **initialisation (->)**
  - Soit $F_1 = (f_{1i})_{i \in IN}$, $F_2 = (f_{2i})_{i \in IN}$, $F' = F_1$ -> F_2 est défini tel que :
  - F_1, F_2 et F sont de même horloge et de même type,
  - $F' = (f'_i)_{i \in IN}$ et $f'_1 = f_{11}$ et $\forall i > 1\ f'_i = f_{2i}$

Illustration

Ici, tous les flots sont sur l'horloge de base

flot	valeur au 1er tick	valeur au 2e tick	valeur au 3e tick	valeur au 4e tick
x	x_1	x_2	x_3	x_4
y	y_1	y_2	y_3	y_4
pre x				
x -> y				
x -> pre y				

Exercice (1)

- **Ecrire le nœud Lustre permettant de compter le nombre d'occurrences de "i" entre deux occurrences successives de "toc". (On ne se préoccupera pas des i survenant avant la première occurrence de toc.)**

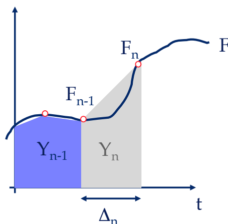
i	F	F	F	T	F	T	T	F
toc	F	T	F	F	F	F	T	F
o	0	0	0	1	1	2	0	0

Exercice (2)

- **Réalisation d'un intégrateur (intégration trapézoïdale)**

Soit F(t) une fonction à intégrer.
L'intégrale Y(t) est définie par : Y(t) = Y(t-1) + (F(t-1) + F(t)) * Δ(t) / 2

Sa discrétisation est donnée par : $Y_n = Y_{n-1} + (F_{n-1} + F_n)*DELTA_n/2$



Exercice (3)

- **Représentez le nœud Lustre construisant les termes de la suite de Fibonacci définie telle que : $x_0=0$, $x_1=1$, $x_{n+2}=x_{n+1}+x_n$**

- **Solution avec gestion explicite des valeurs initiales**

Exercice (4)

- **Que retourne**

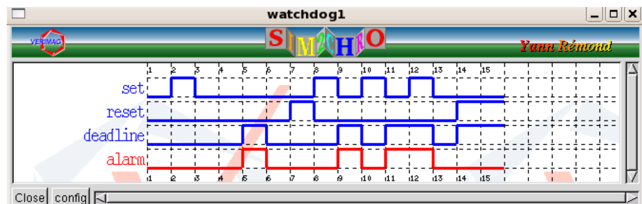
```
node Test (x:int) returns (z,t:int)
let
    z =  0 -> 1 -> 2;
    t =  0 -> pre(1 -> 2);
tel
```

?

Exercice (5) : Chien de garde

- **Chien de garde ou watchdog**
  - **Permet de gérer les échéances, e.g. détecter automatiquement une anomalie du logiciel et réinitialiser le processeur**
  - **3 arguments:** set, reset, deadline
  - **Émet** alarm **lorsque**
    - ***watchdog*** *est activé (un set est survenu depuis le dernier reset),*
    - *et* ***deadline*** *est vrai*

Chronogramme



Chien de garde

- **Nœud du watchdog**

```
node WATCHDOG1 (set, reset,deadline:bool) returns (alarm:bool);
var watchdog_is_on:bool;
let
   alarm =
   watchdog_is_on =


   assert not (set and reset); -- set et reset ne sont jamais
                               -- vrais simultanément
tel;
```

Quelques éléments pour modéliser

- **Respect de la causalité**
- **Codage d'automates**
- **Tuples et tableaux**

Boucles de causalité

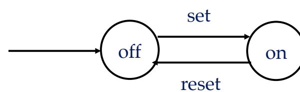
- **Rejeter les boucles de causalité, signes de verrouillage fatal (deadlock)**
  - `let x = x + 1;` **-- x dépend instantanément de lui-même**
- **Les flots définis récursivement doivent être calculables séquentiellement (en fonction des valeurs précédentes)**
- ***Condition syntaxique:* une variable récursive doit toujours être gardée par un délai**
- **Pas de résolution d'équation**

```
x = ( 2 * x - 1 ) / x;  -- programme rejeté

x = if c then y else z; -- programme rejeté
y = if c then t else x;
```

```
x = if c then
       if c then t else x;
       else z;
```

Codage d'automate

- **Problème: comment coder un automate ?**



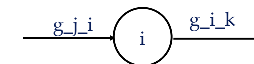

```
node TWO_STATES(set, reset:bool) returns (on:bool);
let
   on = false ->
           if set and not (pre on) then true
           else if reset and (pre on) then false
           else (pre on);
tel;
```

- **Penser en terme d'invariants: quelle est l'expression définissant la valeur de '`on`' à chaque instant**
  - **Contrainte: au plus un état actif à chaque instant**

Codage systématique des automates

- **Une variable booléenne par état :**
  - e_i **est associée à l'état** i : e_i = TRUE ⇔ l'automate est dans l'état i
  - g_i_j : garde de la transition menant de l'état i vers l'état j
  - Expanser la fonction de transition pour chaque état

```
e_i = init_i ->
         if pre e_i
            and (     g_i_j
                   or g_i_k
                       … )
        then false
       else if pre e_j and g_j_i
                 or pre e_k and g_k_i
                 …..
             then true
        else pre e_i;
```



Tuples

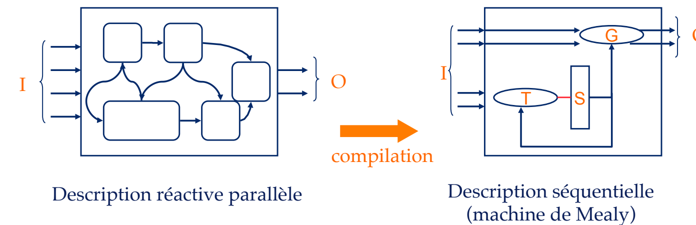
- **Procéder par identification de flots**

```
node position (tick : bool) returns (x,y : int);
let
   x = 0 -> pre x + 1;
   y = 0 -> pre y + 1;
Tel

node distance_carre (tick : bool) returns (d : int);
var x, y : int;
let
   (x, y) = position (tick);
   d = x * x + y * y;
tel
```

Constructeur de tuple

Compilation en code C exécutable

La description Lustre est transcrite en un programme exécutable (C)



Structure du programme exécutable

- **Code séquentiel le plus simple : une boucle infinie**

```
var I, O, S;
proc P_step() … ; // traitement : évaluation de toutes les
équations

S := S0;          // initialisation

foreach step do   // boucle infinie
     read(I);
     P_step();
     write(S);
end foreach
```

- **Le corps de la boucle est instantané**
- `P_step` **est actionné sur l'horloge de base du système**

- ***Détaillé dans la suite du cours***

Vérification

- **Cohérence du programme (analyse statique) : avant la compilation**

- **Vérification par introduction *d'observateurs***
  - **Un module concurrent observant l'évolution de certains flots**
  - **Non intrusif**
  - **Utilisation de clauses `assert` / signaux d'entrées**

- **Analyse par simulation**

- **Analyse exhaustive de l'espace d'états du programme**
  - **Propriétés de sûreté :**
    - *Le système n'entre pas dans un ensemble d'états mauvais*

- ***Détaillé dans la suite du cours***

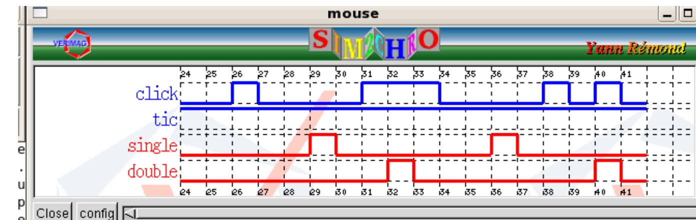
Exercice (6) : contrôleur de souris

Émettre double **si on a reçu 2** click **en moins de 4** top**, sinon** single

```
node counter (res, event: bool) returns (count: int);
var x:int;

let count =
      x =
tel;

node mouse (click, top:bool) returns (single, double:bool);
var counting, res:bool; count:int;

let   counting =
      count = counter(                    );
      single =
      double =
      res =
tel;
```

Chronogramme

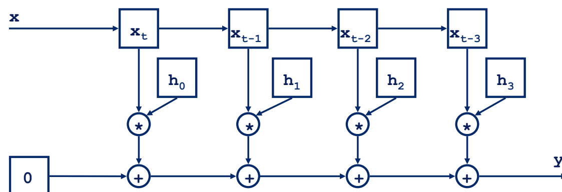
Émettre double si on a reçu 2 click en moins de 4 top, sinon single



Exercice (7) : Filtre à fréquence impulsionnelle finie

- **Filtre FIR**

$$y_t = \sum_{i=0}^{n-1} x_{t-i} * h_i$$



Pour aller plus loin

- **Tableaux**
- **Sur-échantillonnage et sous-échantillonnage de signaux**

Additionneur binaire

- **Additionneur 1 bit**

```
node add1(a,b,c_i : bool) returns (s,c_o : bool);
let
  s = a xor b xor c;
  c_o = (a and b) or (b and c_i) or (c_i and a)
tel
```

- **Additionneur 4 bits**

```
node add4(a0,a1,a2,a3 : bool; b0,b1,b2,b3 : bool)
       returns (s0,s1,s2,s3, carry : bool);
var c0,c1,c2 : bool
let
  (s0,c0) = add1(a0,b0,false);
  (s1,c1) = add1(a1,b1,c0);
  (s2,c2) = add1(a2,b2,c1);
  (s3,carry) = add1(a3,b3,c2);
tel
```

Tableaux de taille fixe

- **Additionneur 4 bits avec tableaux**

```
node add4(A,B : bool^4) returns (S:bool^4; carry : bool);
var C : bool^4;
let
  (S[0],C[0]) = add1(A[0],B[0],false);
  (S[1..3],C[1..3]) = add1(A[1..3],B[1..3],C[0..2]);
  carry = C[3];
tel
```

Déclaration de tableau

Sélection d'un élement

Tranche de tableau

Polymorphisme des opérateurs : extension aux tableaux. L'opérateur est appliqué sur chaque élément du tableau après une étape d'expansion

Tableaux de taille variable

- **Additionneur n bits avec tableaux**

```
node add(const n: int; A,B : bool^n)
     returns (S:bool^n; carry : bool);
var C : bool^n;
let
  (S[0],C[0]) = add1(A[0],B[0],false);
  (S[1..n-1],C[1..n-1]) = add1(A[1..n-1],B[1..n-1],C[0..n-2]);
  carry = C[n-1];
tel
```

Il faut instancier n :

```
const size = 4;
node MAIN_ADD(A,B : bool^size) returns (S:bool^size)
var carry : bool;
let
  (S,carry) = add(size,A,B);
tel
```

Opérateurs temporels (2)

Sous-échantillonage : `when`

Définir un flot plus lent que les entrées

- Soit $F = (f_i)_{i \in IN}$ un flot sur V et $H = (h_i)_{i \in IN}$ un flot booléen
  - F et H sont définis sur la même horloge,
  - X = F `when` H est défini tel que :
    - $X = (x_i)_{i \in IN}$ un flot sur V
    - $x_i = f_i$ ssi h_i = `true`
  - X est sur l'horloge H, elle-même sur une horloge plus rapide

true	true	true	true	true	true	true
B	false	true	false	true	false	false
X	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Y = X when B		x_1		x_3		

Opérateurs temporels (3)

Sur-échantillonage : `current`

Mettre un flot sur l'horloge immédiatement plus rapide

B	false	true	false	true	false	false
X	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Y = X when B		x_1		x_3		
Z = current Y	nil	x_1	x_1	x_3	x_3	x_3

- **L'horloge de `current(Y)` est l'horloge de l'horloge de Y**
  (donc ici l'horloge de B, i.e l'horloge de base)
- **A l'instant initial, `current(Y)` peut ne pas être initialisé:**
  - **Soit prendre une horloge de la forme `true -> clk`**
  - **Soit `current(((if clk then X else init) -> X) when clk)`**

Formalisation de `current`

- **`F = current X`**
  - X un flot d'horloge H, elle-même d'horloge Hb
    (h_i est défini ⇔ hb_i = `true`)
  - v la dernière valeur de X lorsque hb_i = `true`
  - Définition locale d'un élément de F :
    - ***si hb_i = `true`, $f_i = x_i$ et $v := x_i$*** *// **affectation de v! : parcours de X***
    - ***si f_i = v , hb_i = `false`*** *// valeur courante de v : dépend de sa // dernière affectation*

Exemple


```
node somme(i:int) returns (s:int);
let
   s = i -> pre s + i
tel;
```

i	1	1	1	1	1	1
cond	true	false	true	true	false	true
somme i	1	2	3	4	5	6
somme (i when cond)	1		2	3		4
(somme i) when cond	1		3	4		6

- **Remarques**
  - `f(x when c) ≠ (f x) when c`
  - `current (x when c) ≠ x`

Exemple (2)

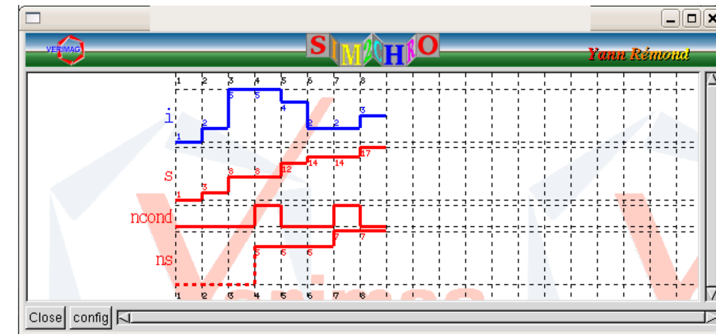

```
node stables(i:int)  -- horloge de base (true)
  returns (s:int; ncond:bool;
           (ns:int) when ncond);  -- déclaration d'horloge
var cond:bool;
      (l:int) when cond;  -- déclaration d'horloge
let
    cond = true -> i <> pre i;
    ncond = not cond;
    l = somme (i when cond);
    s = current (l);
    ns = somme (i when ncond);
tel;
```

- **Les horloges doivent être déclarées et visibles dans l'interface du nœud**
- **Les deux nœuds somme ne sont pas partagés**

Détail des flots

	1er tick	2e tick	3e tick	4e tick	5e tick	6e tick	7e tick	8e tick
i	1	2	5	5	4	2	2	3
cond								
ncond								
l								
s								
ns								

Chronogramme



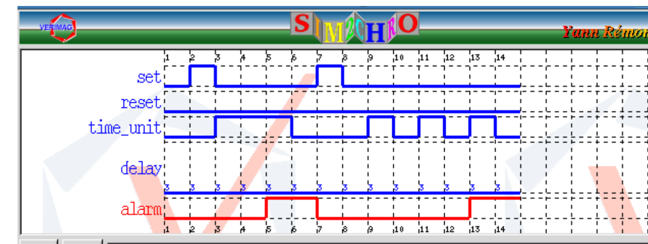
Le chien de garde (3)

- **Le chien de garde reçoit un signal supplémentaire donnant son horloge. Le détail est donc compté suivant une unité de temps (nombre d'occurrence d'un évènement** time_unit**)**

```
node WATCHDOG3(set, reset, time_unit:bool;delay:int)
   returns (alarm:bool);
var clk:bool;
let alarm = current (WATCHDOG2((set, reset, delay) when clk));
      clk = true -> set or reset or time_unit;
tel;
```

- **Remarque: une composition** `current (f(x when c))` **est une « condition d'activation »**

Chronogramme



Contraintes d'horloge (1)


```
let half = true -> not pre half;
      y = x and (x when half);
tel
```

- Correspond à la suite $\forall n, Y_n = X_n \& X_{2n}$
- Ce programme doit être rejeté : Pas d'implantation en mémoire bornée

Contraintes d'horloge (2)

- Quelques contraintes à connaître :
  - Les constantes sont sur l'horloge de base du nœud
  - Par défaut, les variables sont sur l'horloge de base du nœud,
    - clock (e1 op e2) = clock (e1) = clock (e2)
    - clock (e when c) = c
    - clock (current (e)) = clock (clock (e))
- Choix d'implantation :
  - Les horloges sont déclarées et vérifiées
  - Pas d'inférence (plus compliqué)
  - Deux horloges sont égales si elles peuvent être rendues syntaxiquement égales après substitution

Exercice *[repris de P. Raymond]*

- Complétez le tableau suivant

X	4	1	-3	0	2	7	8	13
Y	true	false	true	true	true	false	false	true
C	true	true	false	true	true	false	true	true
Z = X when C								
H = Y when C								
T = Z when H								
current (T)								