

Esterel

*un langage synchrone
pour décrire des systèmes réactifs*

Cours N°5

Nadine Richard
nrichard@eu.org

Master d'Informatique
Université Pierre et Marie Curie

année 2010-2011

Plan du cours

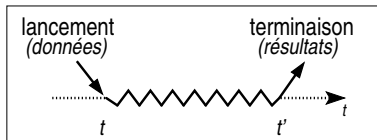
- ▶ Classification selon D. Harel et A. Pnueli
- ▶ Les systèmes réactifs
- ▶ Approche synchrone pour les systèmes réactifs
- ▶ Esterel : un langage synchrone impératif
- ▶ Machine d'exécution et compilation
- ▶ Conclusion
- ▶ Autres applications du modèle synchrone
- ▶ Références

Classification

- ▶ Systèmes transformationnels
- ▶ Systèmes interactifs et réactifs

Systèmes transformationnels

- ▶ Effectue des calculs :
 - ▶ à partir des données fournies
 - ▶ pour produire des résultats
 - ▶ puis se terminer.



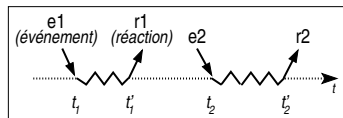
- ▶ Exemples : compilateur/traducteur, éditeur de factures

Systèmes interactifs et réactifs

- ▶ Interagit continuellement avec son environnement :
 - ▶ doit fournir une réponse aux événements reçus
 - ▶ ne se termine pas !

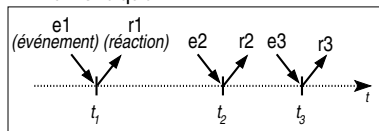
- ▶ Interactif

- ▶ réagit à son rythme
- ▶ exemples : base de données, IHM non critique



- ▶ Réactif

- ▶ réagit au rythme imposé par l'environnement
- ▶ exemples : contrôle de processus industriels, IHM critique



Systèmes réactifs

- ▶ Théorie et pratique
- ▶ Approches traditionnelles
- ▶ Approche synchrone
- ▶ Systèmes réactifs temps-réel
- ▶ Langages et outils synchrones

Systèmes réactifs : théorie et pratique

- ▶ En théorie : réaction en temps nul
- ▶ En pratique : implémentés par des systèmes interactifs suffisamment rapides
 - ▶ pour prendre en compte tous les stimuli
 - ▶ pour y répondre à temps

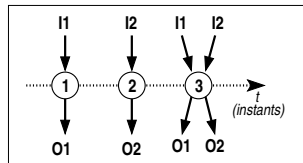
Approches traditionnelles

- ▶ Automate
 - ▶ comportement déterministe
 - ▶ exécution efficace
 - ▶ mais : faible maintenabilité

- ▶ Langage + exécutif temps-réel multi-tâches
 - ▶ tâches coopérantes + communication asynchrone
 - ▶ primitives pour le parallélisme et la synchronisation (tâches et rendez-vous en Ada)
 - ▶ mais : déterminisme non garanti

Approche synchrone

- ▶ Échelle de temps logique discret



- ▶ instant = réaction du système
 - ▶ réaction en temps nul : une réaction commencée doit se terminer avant que débute la suivante, donc avant qu'un nouvel événement arrive
 - ▶ signaux en entrée et en sortie simultanés
- ▶ Fondements mathématiques
 - ▶ déterminisme garanti
 - ▶ composition de systèmes synchrones \Rightarrow système synchrone
 - ▶ outils automatiques de vérification formelle

Systèmes réactifs temps-réel

- ▶ Système temps-réel
 - ▶ résultat correct + respect des contraintes temporelles
⇒ résultat faux s'il arrive trop tard !
 - ▶ contraintes temporelles : strictes ou souples (délai moyen)
 - ▶ systèmes critiques : *safety critical* ou *mission critical*
- ▶ Caractéristiques principales
 - ▶ prévisibilité = parfaitement déterministe
 - ▶ sûreté = comportement garanti (situations extrêmes)
- ▶ ... d'où l'utilisation de systèmes réactifs synchrones !

Langages et outils synchrones

- ▶ Langages impératifs (signaux discrets)
Esterel (*INRIA, ENMP, CMA*), Marvin (*ENST*)
- ▶ Langages à «flots de données» (signaux continus)
Signal (*INRIA*), Lustre (*IMAG*), Lucid Sychrone (*INRIA, LIP6, IMAG*)
- ▶ Formalismes (description graphique d'automates)
SyncCharts (proche d'Esterel), Argos (proche de Lustre), HPTS (proche de Signal)
- ▶ Esterel Technologies : Esterel studio
compilateur Esterel, éditeur de SyncCharts, simulateur interactif, ...

Le langage Esterel

- ▶ Caractéristiques et principes du langage
- ▶ Cycle de vie d'une instruction
- ▶ Modules
- ▶ Expressions de signaux, émission instantanée
- ▶ Immédiat vs. différé
- ▶ Manipulation de données
- ▶ Types, fonctions et procédures externes
- ▶ Prémption et trappes
- ▶ Instructions dérivées
- ▶ Composition de modules
- ▶ Tâches asynchrones

Caractéristiques du langage

- ▶ Langage réactif synchrone de nature impérative
 - ▶ instructions impératives : séquence, composition parallèle, ...
 - ▶ instructions réactives : pause, attente d'événement, ...

- ▶ Avec :
 - ▶ programmation modulaire
 - ▶ manipulation de données : types prédéfinis ou externes
 - ▶ mécanismes de trappe et de préemption
 - ▶ gestion des tâches asynchrones

Principes fondamentaux

▶ Instant

- ▶ instant t de début d'une instruction (1^{er} instant)
- ▶ instant t' de terminaison, avec $t' \geq t$
- ▶ instruction instantanée si $t' = t$
- ▶ instant suivant : $t + 1$

▶ Signal

- ▶ en entrée et/ou en sortie
- ▶ caractérisé par son statut : présent ou absent
- ▶ pur ou valué (information typée)
- ▶ généré par l'environnement ou envoyé avec emit
- ▶ diffusé *instantanément* (*broadcast*)
- ▶ tick : top d'horloge

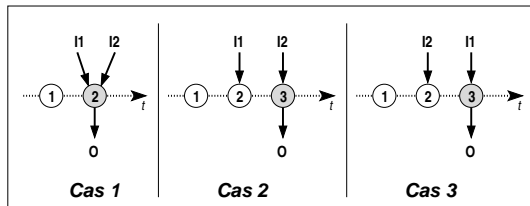
Cycle de vie d'une instruction

- ▶ Terminaison
 - ▶ spontanée, sauf pour la boucle infinie (`loop`)
 - ▶ avortement, si dans une construction `abort`
 - ▶ composition parallèle : quand les 2 composantes ont terminé

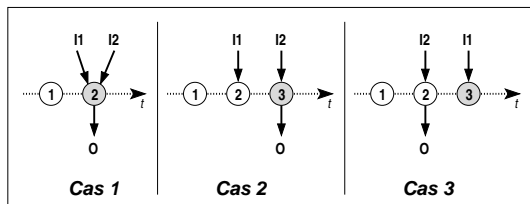
- ▶ Suspension = composition active sur plusieurs instants
 - ▶ `pause` : reprise à l'instant suivant
 - ▶ `await` : attente d'un signal

Premiers exemples

[await I1 || await I2] ; emit 0



await I1 || await I2 ; emit 0

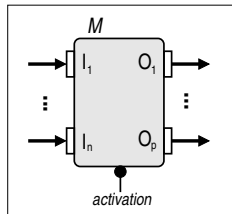


Modules

- ▶ Programme Esterel = module
 - ▶ interface : signaux en entrée/sortie + déclarations d'objets externes
 - ▶ corps : composition d'instructions impératives et réactives
 - ▶ sous-modules

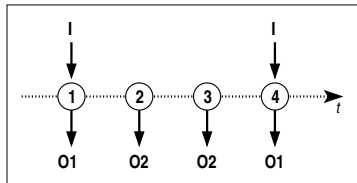
- ▶ Réaction d'un module

- ▶ réaction instantanée à l'activation
- ▶ émission de signaux et/ou modifications internes



Exemple de module

```
module M :  
  % Interface  
  input I ;  
  output O1, O2 ;  
  
  % Corps  
  loop  
    present I then  
      emit O1  
    else  
      emit O2  
    end present ;  
    pause  
  end loop  
end module
```



Attention à la boucle infinie !

Expression de signaux

- ▶ Instructions liées au statut : `present` et `await`

- ▶ Attente infinie : `halt`

- ▶ Attente de plusieurs occurrences

```
await 4 S
```

- ▶ Expressions booléennes

```
present [ I1 and I2 ] or [ not I3 ]  
  then emit 0  
end present
```

Émission instantanée de signal

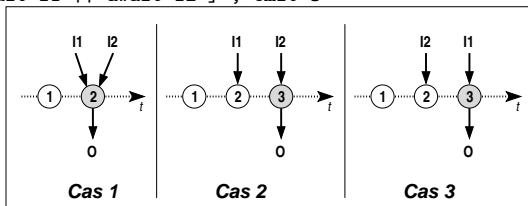
- ▶ **Avantage** : partage immédiat du statut et de la valeur du signal aux composantes parallèles et aux sous-modules
- ▶ **Inconvénient** : la présence d'un signal peut être testée dans l'instant même où il est émis ...

```
% 0 sera émis à chaque instant !  
loop  
  [ present S  
    then emit 0  
    end present  
  ||  
    emit S ] ; pause  
end loop
```

Immédiat vs. différé

- ▶ `await` = attente différée à l'instant suivant

```
[ await I1 || await I2 ] ; emit 0
```



- ▶ Prise en compte immédiate d'un signal

```
await immediate I ;  
emit 0
```

```
if present I  
  then emit 0  
  else await I ; emit 0  
end present
```

Manipulation de données

▶ Types

- ▶ prédéfinis : integer, float, double, boolean, string
- ▶ externes/utilisateurs

▶ Variable locale

- ▶ déclaration : `var V : integer in ... end var`
- ▶ lecture de la valeur : `V`
- ▶ affectation : `V := 1`
- ▶ déclaration + initialisation : `var V := 0 : integer in...`

▶ Attention aux compositions invalides !

```
% Doit être refusé par le compilateur  
X := X + 1 || X := 3
```

Exemple d'utilisation de variables

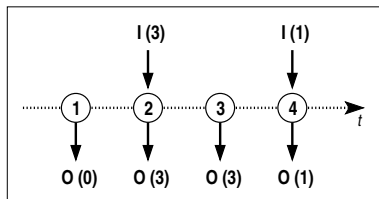
```
module M :  
  output Equal ;  
  constant C : integer ;  
  var X := 0 : integer, Y : integer in  
    Y := C ;  
    loop  
      if (X = Y)  
        then emit Equal ; X := 0 ; Y := C  
        else X := X + 1  
        end if ;  
      pause  
    end loop  
  end var  
end module
```

Valeur d'un signal (1)

- ▶ Valeur indéterminée tant que le signal n'a pas été émis
- ▶ Opérations
 - ▶ déclaration : `input I : boolean ;`
 - ▶ déclaration + initialisation : `input I := true : boolean ;`
 - ▶ lecture de la dernière valeur : `?I`
 - ▶ émission évaluée : `emit 0 (13)`
- ▶ Attention à la diffusion instantanée !
`emit S (?S + 1) % Impossible d'avoir S = S+1`

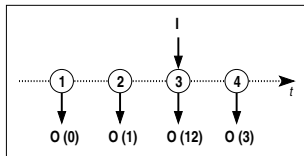
Valeur d'un signal (2)

```
module Observe :  
  input I := 0 :  
    integer ;  
  output O :  
    integer ;  
  
  loop  
    emit O (?I) ;  
    pause  
  end loop  
end module
```



Combinaison de valeurs d'un signal

Quand un signal valué peut être émis plusieurs fois au même instant



```
module M :
  input I ;
  output O :
    combine integer
    with + ;
  var X := 0 : integer
  in
    loop
      [ emit O (X) ; X := X + 1
        || present I then emit O (10) ] ;
      pause
    end loop
  end var
end module
```

Capteurs

Signal dégénéré sans statut \Rightarrow variable externe en lecture seule

```
module Thermometre :  
  input Calculate ;  
  output Fahrenheit : float ;  
  sensor Celsius : float ;  
  
  function c2f (float) : float ;  
  
  loop  
    emit Fahrenheit (c2f (?Celsius)) ;  
  each Calculate  
end module
```

Types, fonctions et procédures externes

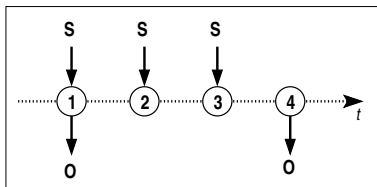
Les fonctions et les procédures s'exécutent en temps nul !

```
module M :  
  type T ;  
  procedure Increment (T) (int) ; % E/S et E  
  function Init () : T ;  
  function Test (T) : boolean ;  
  var X := Init () : T  
  in  
    loop  
      if (Test (X))  
        then call Increment (X) (1)  
      end if ;  
      pause  
    end loop  
  end var  
end module
```

Préemption

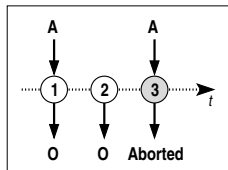
- ▶ Trois mécanismes pour interrompre une composition sur un signal :
 - ▶ suspension
 - ▶ avortement fort
 - ▶ avortement faible
- ▶ Suspension... puis reprise

```
suspend  
  loop  
    emit 0 ;  
  pause  
end loop  
when S
```

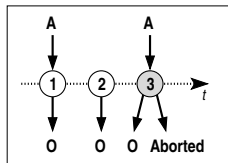


Avortement fort ou faible ?

```
abort
  loop
    emit 0 ; pause
  end loop
when A ;
emit Aborted
```



```
weak abort
  loop
    emit 0 ; pause
  end loop
when A ;
emit Aborted
```



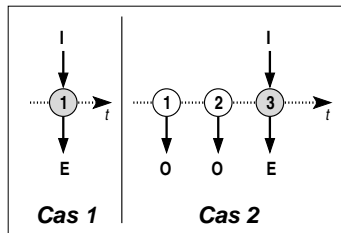
+ mot-clé *immediate*

+ composition à exécuter quand le signal est reçu (*do...end abort*)

Trappes

S'échapper d'un traitement en précisant un motif

```
trap T in
  loop
    present I
      then exit T
    end present ;
    emit 0
  each tick
end trap ;
emit E
```



+ `handle...do` pour récupérer l'échappement

Instructions dérivées (1)

▶ Boucles étendues

▶ `loop p each S`

si p termine, attendre S pour reprendre

si S reçu avant la terminaison de p , avorter p puis reprendre

<code>loop</code>		<code>loop</code>
<code>emit 0</code>	<code><=></code>	<code>abort</code>
<code>each I</code>		<code>emit 0 ; halt</code>
		<code>when S</code>
		<code>end loop</code>

▶ `every S do p`

idem, sauf attente d'une première occurrence de S

▶ Répétition instantanée :

`repeat n times p end repeat`

Instructions dérivées (2)

- ▶ Test multiple de signaux vs. attente hiérarchisée

```
present
  case Hello do
    emit 0 ("hello")
  case World do
    emit 0 ("world")
  else
    emit 0 ("snif!")
end present
```

```
await
  case I1 do
    emit 0 (1)
  % Si I1 absent...
  case I2 do
    emit 0 (10)
  % Pas de 'else' !
end await
```

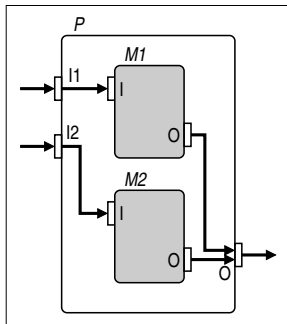
- ▶ Émission permanente d'un signal

```
sustain 0    <=>
```

```
loop
  emit 0
each tick
```

Composition de modules (1)

Instanciation de sous-modules + substitution de signaux



```
module M :  
  input I ;  
  output O ;  
  % Corps...  
end module
```

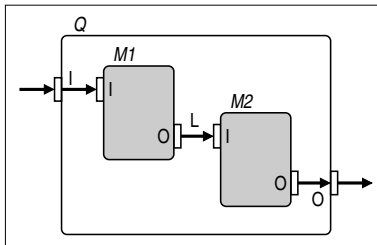
```
module P :  
  input I1, I2 ;  
  output O ;
```

```
    run M1/M [ signal I1/I ]  
  ||  
    run M2/M [ signal I2/I ]  
end module
```

Composition de modules (2)

+ déclaration de signaux locaux

```
module M :  
  input I ;  
  output O ;  
  % Corps...  
end module  
  
module Q :  
  input I ;  
  output O ;  
  signal L in  
    run M1/M [ signal L/O ]  
  ||  
    run M2/M [ signal L/I ]  
  end signal  
end module
```



Tâches asynchrones (1)

- ▶ Pour les traitements non-instantanés = transformationnels
⇒ traitements externes
- ▶ Manipulation de tâche :
 - ▶ Déclaration d'une tâche : `task`
 - ▶ Déclaration d'un signal de retour : `return`
 - ▶ Lancement de l'exécution d'une tâche : `exec`
 - ▶ puis attente implicite de la fin d'une tâche
- ▶ Terminaison spontanée
 - ▶ mise à jour instantanée des paramètres
 - ▶ instruction `exec` terminée
- ▶ Test du signal de retour : fin spontanée ou avortement ?

Tâches asynchrones (2)

```
module M :
  type Coords, Traj ;
  input Current : Coords ;
  output NewTrajectory : Traj ;
  return R ;
  task ComputeTrajectory (Traj) (Coords) ;
  var T : Traj in
    [ loop
      await Current ;
      exec ComputeTrajectory (T) (?Current)
      return R ;
      emit NewTrajectory (T)
    end loop ]
  || p % Corps à exécuter en parallèle
  end var
end module
```

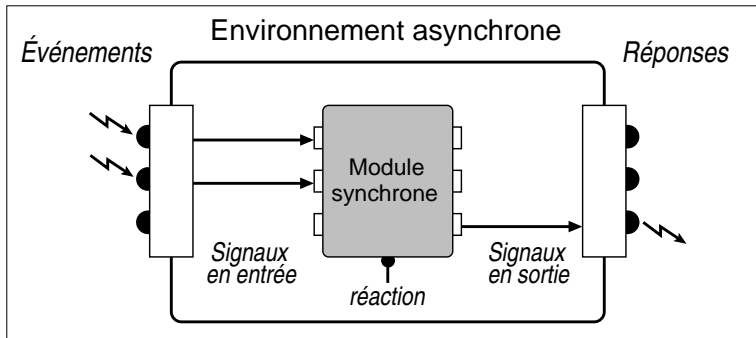
Exécution d'un système décrit en Esterel

- ▶ Machine d'exécution
- ▶ Compilation d'un programme Esterel

Machine d'exécution (1)

- ▶ Mécanismes d'interfaçage système/environnement
 - ▶ stockage des événements asynchrones
 - ⇒ traduction en signaux synchrones
 - ▶ activation du module
 - ▶ exécution des tâches asynchrones
- ▶ Contraintes :
 - ▶ exécution complète de chaque réaction
 - ▶ positionnement des signaux en entrée avant l'activation
- ▶ Stratégies d'activation
 - ▶ sur l'arrivée des signaux (événements sporadiques)
 - ▶ par échantillonnage périodique (interaction continue)

Machine d'exécution (2)



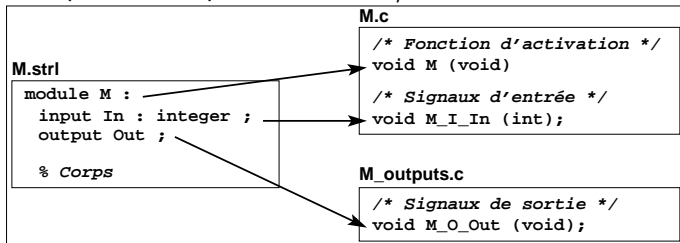
Compilation d'un programme Esterel

- ▶ Vers la description :
 - ▶ d'un automate
 - ▶ d'un circuit booléen \Rightarrow circuit simulé ou réel
- ▶ Étapes de compilation en C :

```
str1 m.str1
```

```
gcc -c m.c -o m_main.o
```

- ▶ Exemple de correspondance Esterel/C

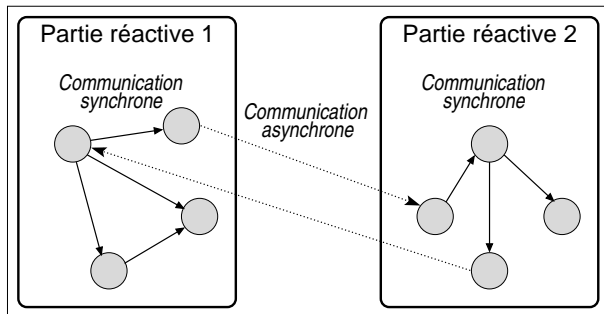


Conclusion

- ▶ Modèle synchrone
 - ▶ facilite la description de systèmes réactifs
 - ▶ comportement déterministe garanti
 - ▶ vérification formelle
- ▶ Esterel
 - ▶ langage impératif synchrone
 - ▶ adapté à la description de systèmes temps-réel critiques
 - ▶ nombreux outils de développement disponibles
 - ▶ nécessite une machine d'exécution respectant les hypothèses du modèle synchrone
 - ▶ inconvénient : architecture statique du système décrit

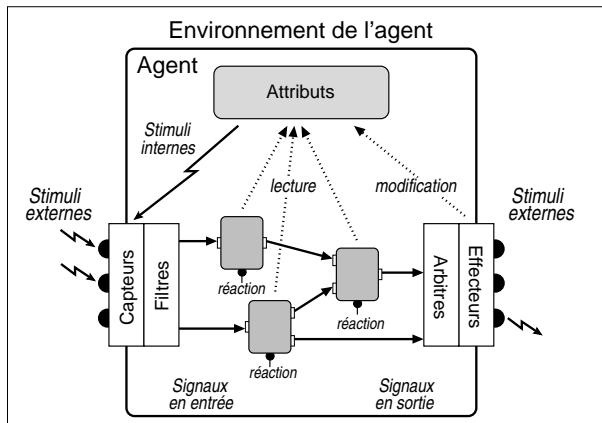
Autres applications du modèle synchrone (1)

- ▶ F. Boussinot
 - ▶ simplification : réaction à l'absence d'un signal reportée au début de l'instant suivant
 - ▶ Reactive-C, FairThreads, réseaux de processus réactifs, objet réactifs, ...
- ▶ F. Boulanger : objets synchrones



Autres applications du modèle synchrone (2)

- Description d'agents virtuels :
modèle InViWo et langage Marvin



Références

The Foundations of Esterel, G. Berry, 1998.

The Esterel v5 Language Primer, G. Berry, 1999.

On the development of reactive systems, D. Harel et A. Pnueli, 1985.

www.esterel-technologies.com/

www-sop.inria.fr/meije/meije-fra.html

www-sop.inria.fr/mimoso/rp/

Exemple : le réveil (1)

```
module reveil_matin :  
  
    input Minute ;  
    input AlarmAt : integer ; % En minutes  
    input CancelAlarm ;  
  
    output WakeUp ;  
    output Time : integer ; % En minutes
```

Exemple : le réveil (2)

```
% Écoulement des minutes
var elapsed : integer in
  elapsed := 0 ;
  every Minute do
    elapsed := elapsed + 1 ;
    emit Time (elapsed) ;
  end every
end var
```

||

Exemple : le réveil (3)

```
% Gestion de l'alarme
every AlarmAt do
  abort
  await ?AlarmAt Minute ;
  emit WakeUp ;
  when CancelAlarm ;
end every
end module
```


Exemple : le téléphone (1)

```
module telephone :  
  input Seconde ;  
  input Decrocher ;  
  input Saisie_numero ;  
  input Appel ;  
  input Raccrocher ;  
  
  output Temps_communication : integer ;  
  output Sonnerie ;  
  output Echec_appel ;
```

Exemple : le téléphone (2)

```
% Appel sortant
loop
  var echec : boolean in
    await Decrocher ;
    echec := false ;
  abort
    await 10 Seconde ;
    emit Echec_appel ;
    echec := true ;
  when Saisie_numero ;
```

Exemple : le téléphone (3)

```
if not echec then
  abort
  var total := 0 : integer in
    every Seconde do
      total := total + 1 ;
      emit Temps_communication (total)
    end every
  end var
  when Raccrocher ;
  else await Raccrocher ;
  end if
end var
end loop
```

Exemple : le téléphone (4)

```
|| % Appel entrant
loop
  var echec : boolean in
    await Appel ;
    echec := false ;
    abort
  abort
    every Seconde do
      emit Sonnerie ;
    end every;
  when 20 Seconde ;
    emit Echec_appel ;
    echec := true ;
  when Decrocher ;
```

Exemple : le téléphone (5)

```
if not echec then
  abort
  var total := 0 : integer in
    every Seconde do
      total := total + 1 ;
      emit Temps_communication (total) ;
    end every
  end var
  when Raccrocher ;
end if
end var
end loop
end module
```