# ESTEREL

## *un langage synchrone*
## *pour décrire des systèmes réactifs*

Nadine Richard
nrichard@eu.org

# Plan du cours

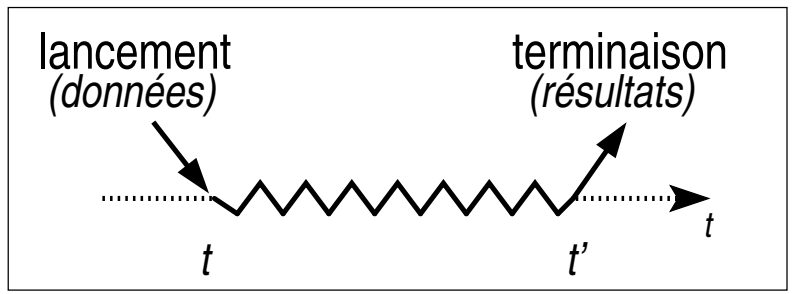
- Classification selon D. Harel et A. Pnueli
- Les systèmes réactifs
- Approche synchrone pour les systèmes réactifs
- ESTEREL : un langage synchrone impératif
- Machine d'exécution et compilation
- Conclusion
- Autres applications du modèle synchrone
- Références

# Classification

- Systèmes transformationnels
- Systèmes interactifs et réactifs

# Systèmes transformationnels

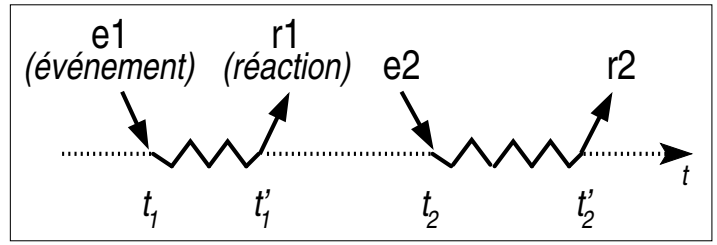
- Effectue des calculs :
  - à partir des données fournies
  - pour produire des résultats
  - puis se terminer.



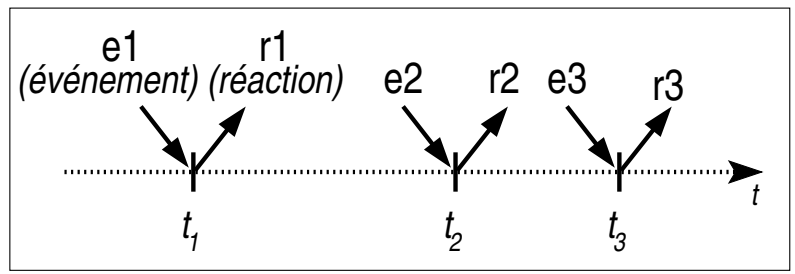

- Exemples : compilateur/traducteur, éditeur de factures

# 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

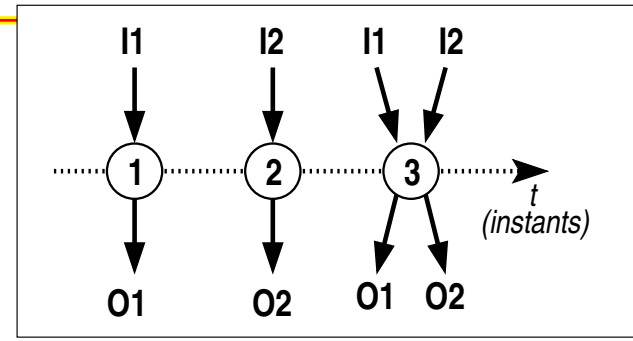
- En théorie : réaction en temps nul
- En pratique : implémentés par des systèmes interactifs suffisamment rapides
  - pour prendre en compte tous les stimuli
  - pour y répondre à temps

# 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
    $\Rightarrow$ 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 SYNCHRONE *(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
- Préemption 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

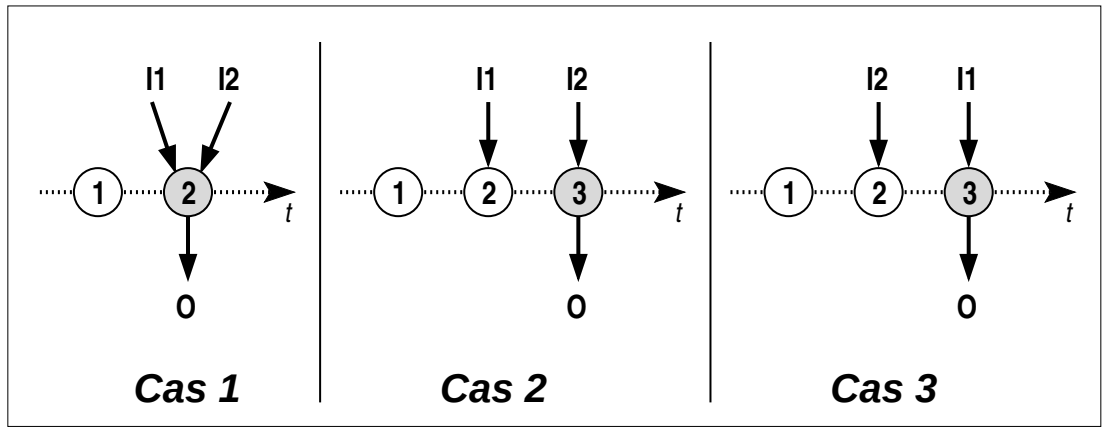
- Instant
  - instant $t$ de début d'une instruction (1$^{er}$ instant)
  - instant $t'$ de terminaison, avec $t' \geq t$
  - instruction instantanée si $t' = t$
  - instant suivant : $t + 1$
- Signal
  - en entrée et/ou en sortie
  - caractérisé par son statut : présent ou absent
  - pur ou valué (information typée)
  - généré par l'environnement ou envoyé avec `emit`
  - diffusé *instantanément* (*broadcast*)
  - `tick` : top d'horloge

# Cycle de vie d'une instruction

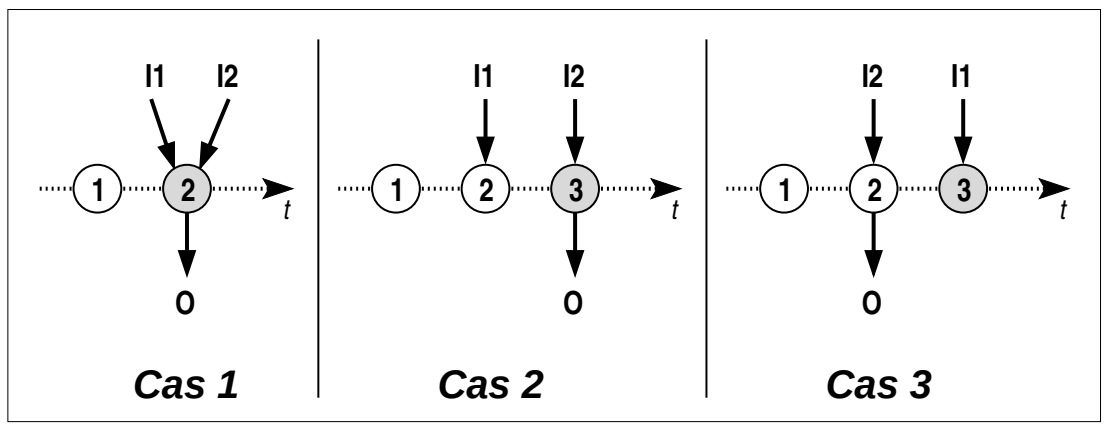
- Terminaison
  - spontanée, sauf pour la boucle infinie (`loop`)
  - avortement, si dans une construction `abort`
  - composition parallèle : quand les 2 composantes ont terminé
- Suspension = composition active sur plusieurs instants
  - `pause` : reprise à l'instant suivant
  - `await` : attente d'un signal

# Premiers exemples

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

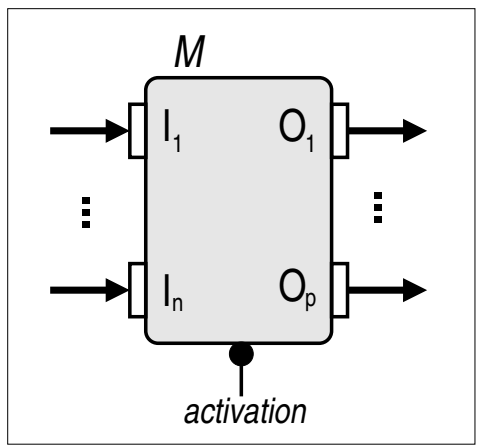



```
await I1 || await I2 ; emit O
```



# 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

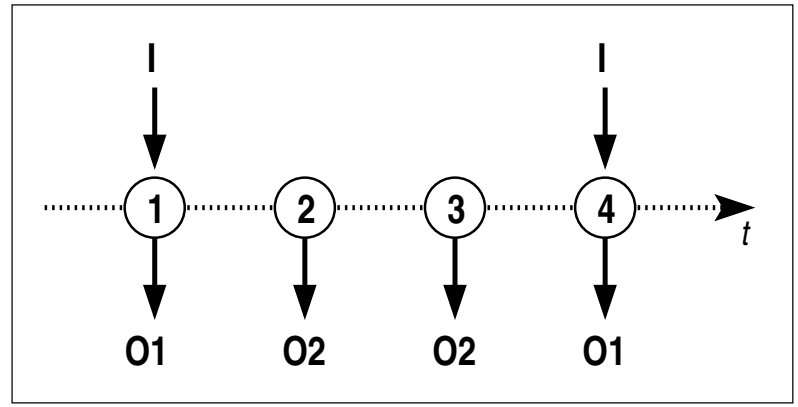



  - réaction instantanée à l'activation
  - émission de signaux et/ou modifications internes

# 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 O
end present
```

# Émission instantanée de signal

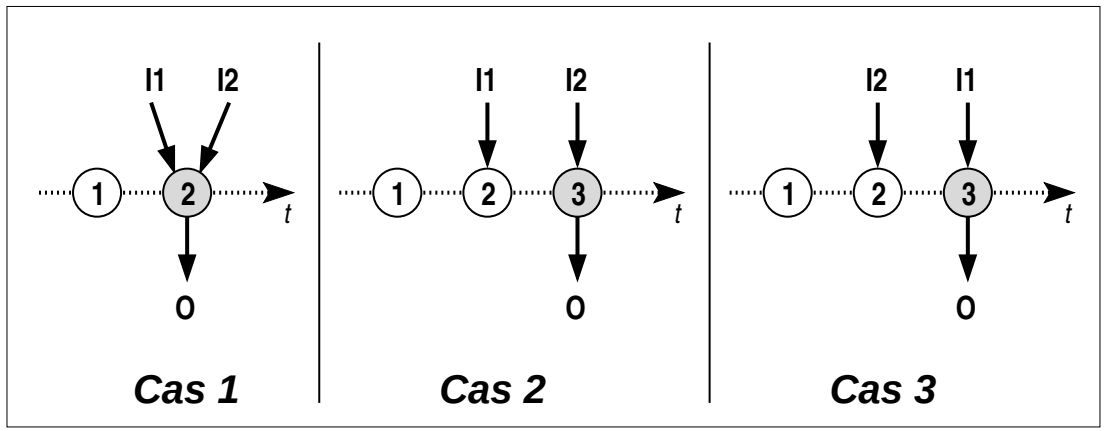
- Avantage : partage immédiat du statut et de la valeur du signal aux composantes parallèles et aux sous-modules
- Inconvénient : la présence d'un signal peut être testée dans l'instant même où il est émis . . .

```
% O sera mis  chaque instant !
loop
 [ present S
     then emit O
   end present
||
   emit S ] ; pause
end loop
```

# Immédiat *vs.* différé

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

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




- Prise en compte immédiate d'un signal

```
await immediate I ;
emit O
```

```
if present I
  then emit O
  else await I ; emit O
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 valuée : `emit O (13)`

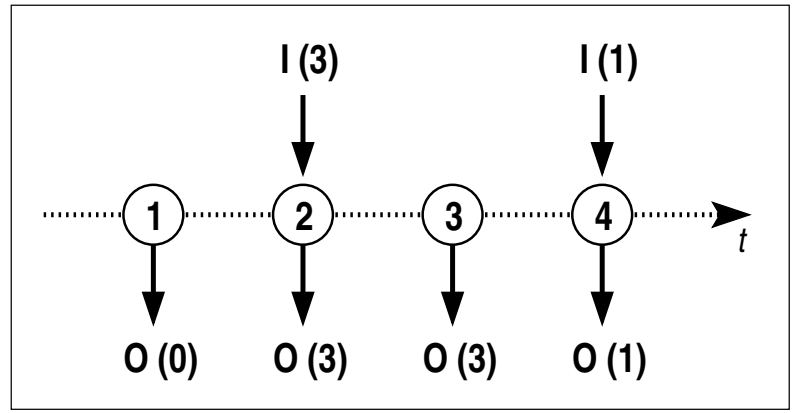
- Attention à la diffusion instantanée !

```
emit S (?S + 1) % Impossible d'avoir S = S+1
```

# Valeur d'un signal (2)

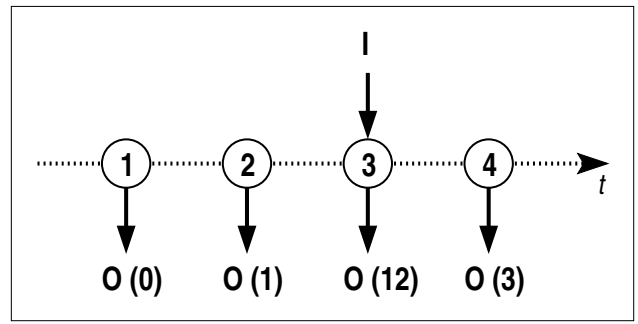
```
module Observe :
  input I := 0 :
    integer ;
  output O :
    integer ;

  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

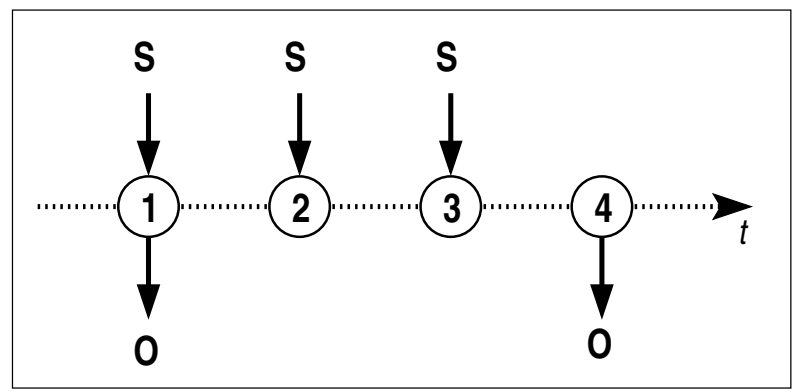
Les fonctions et les procédures s'exécutent en temps nul !

```
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

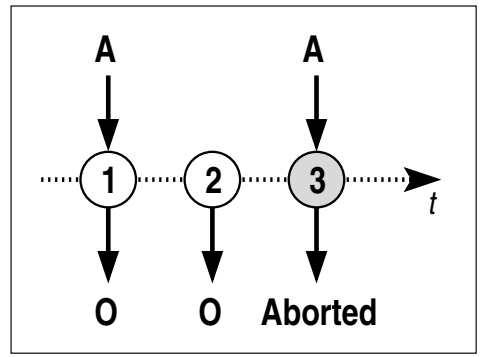
- Trois mécanismes pour interrompre une composition sur un signal :
  - suspension
  - avortement fort
  - avortement faible
- Suspension... puis reprise

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

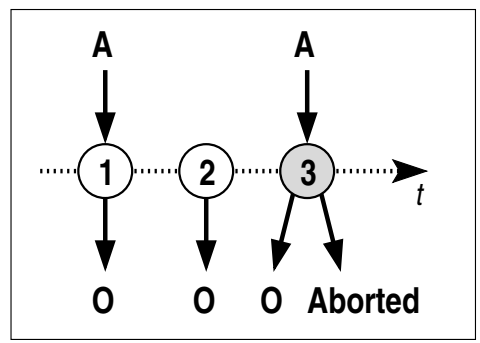


# Avortement fort ou faible ?

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




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

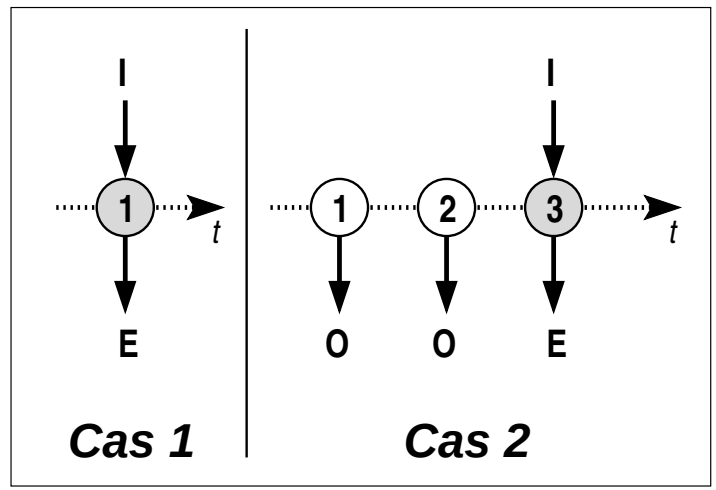



+ mot-clé `immediate`
+ composition à exécuter quand le signal est reçu (`do...end abort`)

# Trappes

S’échapper d’un traitement en précisant un motif

```
trap T in
  loop
    present I
      then exit T
    end present ;
    emit O
  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

```
loop                          loop
  emit O          <=>           abort
each I                            emit O ; halt
                                when S
                              end loop
```

  - `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 O ("hello")
  case World do
    emit O ("world")
  else
    emit O ("snif!")
end present
```

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

- Émission permanente d'un signal

```
sustain O      <=>
```

```
loop
  emit O
each tick
```

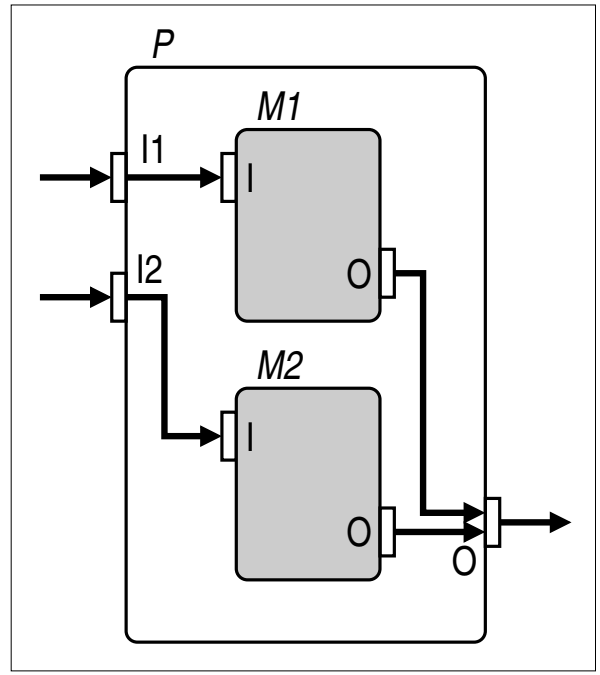
# Composition de modules (1)

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
```

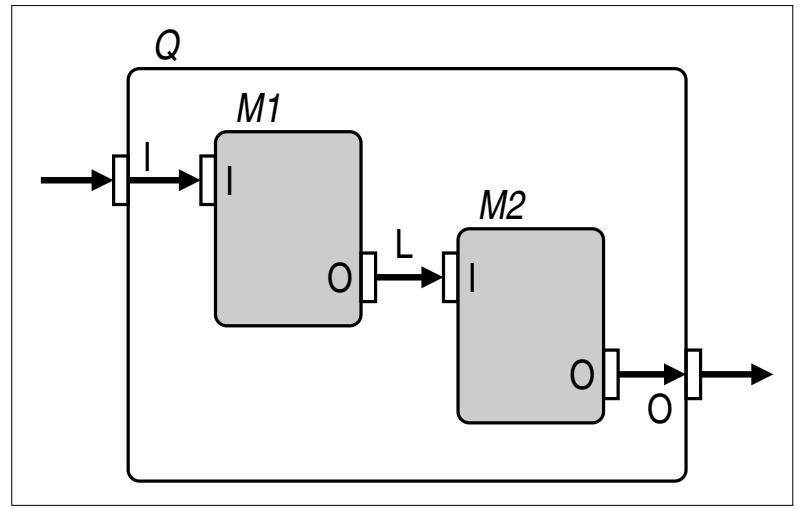


# Composition de modules (2)

+ 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
  $\Rightarrow$ 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
```

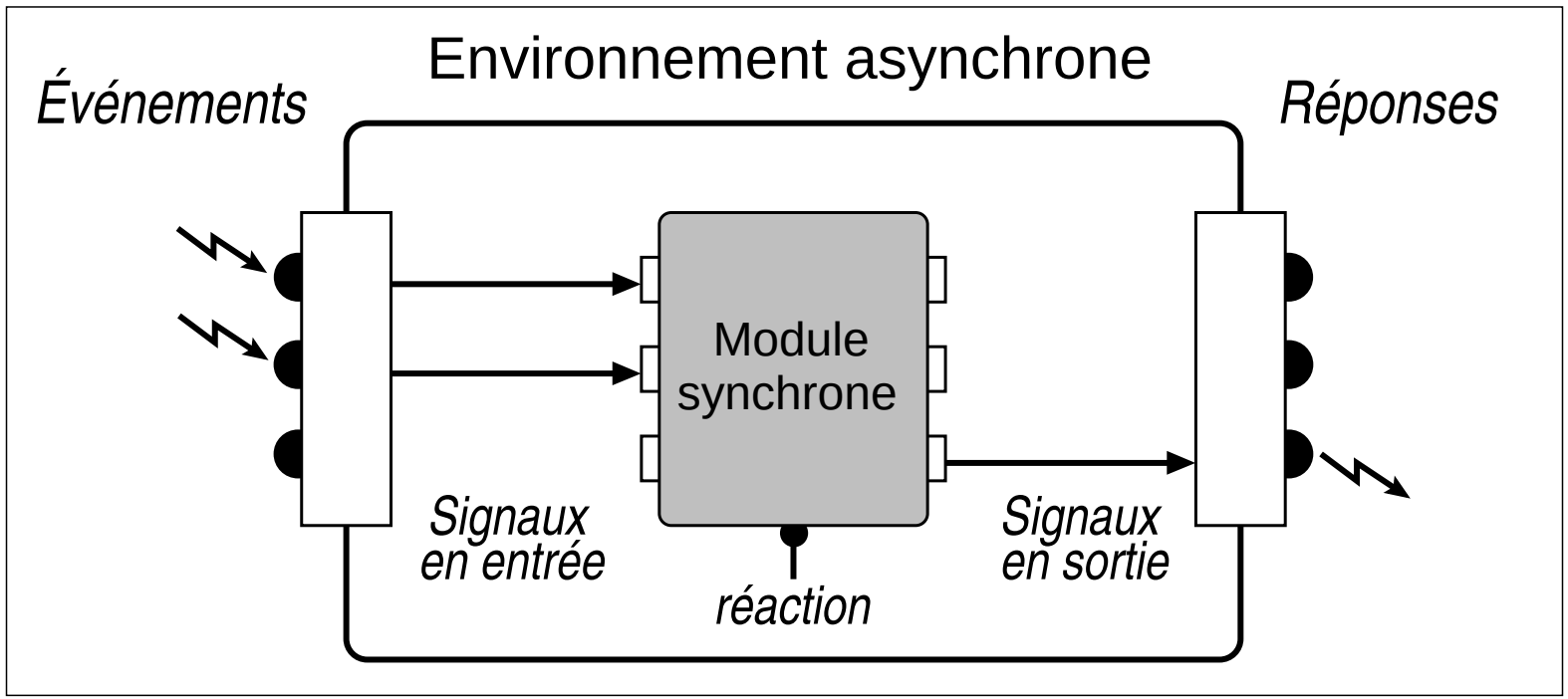
# Exécution d'un système décrit en ESTEREL

- Machine d'exécution
- Compilation d'un programme ESTEREL

# Machine d'exécution (1)

- Mécanismes d'interfaçage système/environnement
  - stockage des événements asynchrones
    $\Rightarrow$ 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)

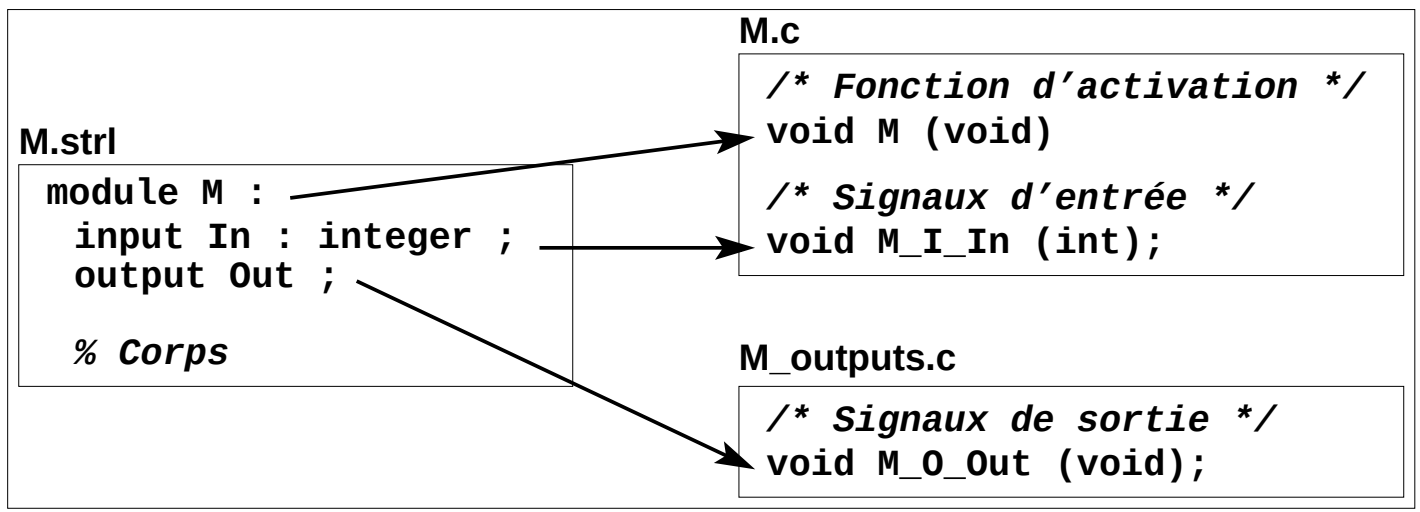


# Compilation d'un programme ESTEREL

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

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

- Exemple de correspondance ESTEREL/C

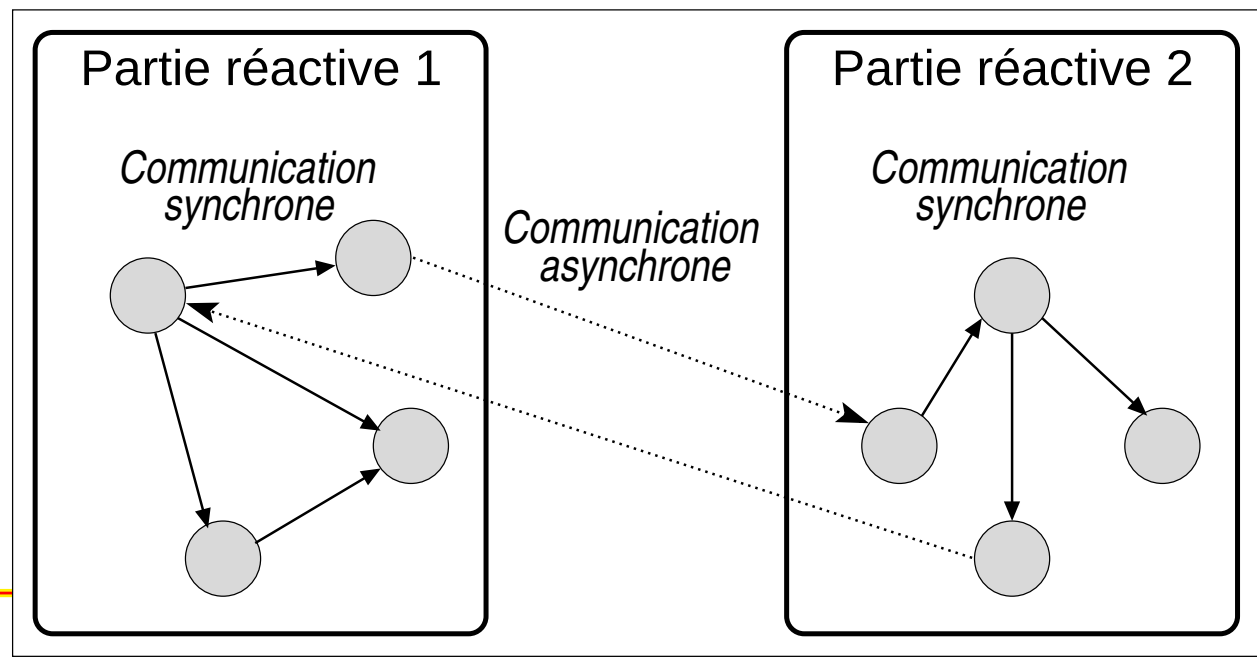


# Conclusion

- 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

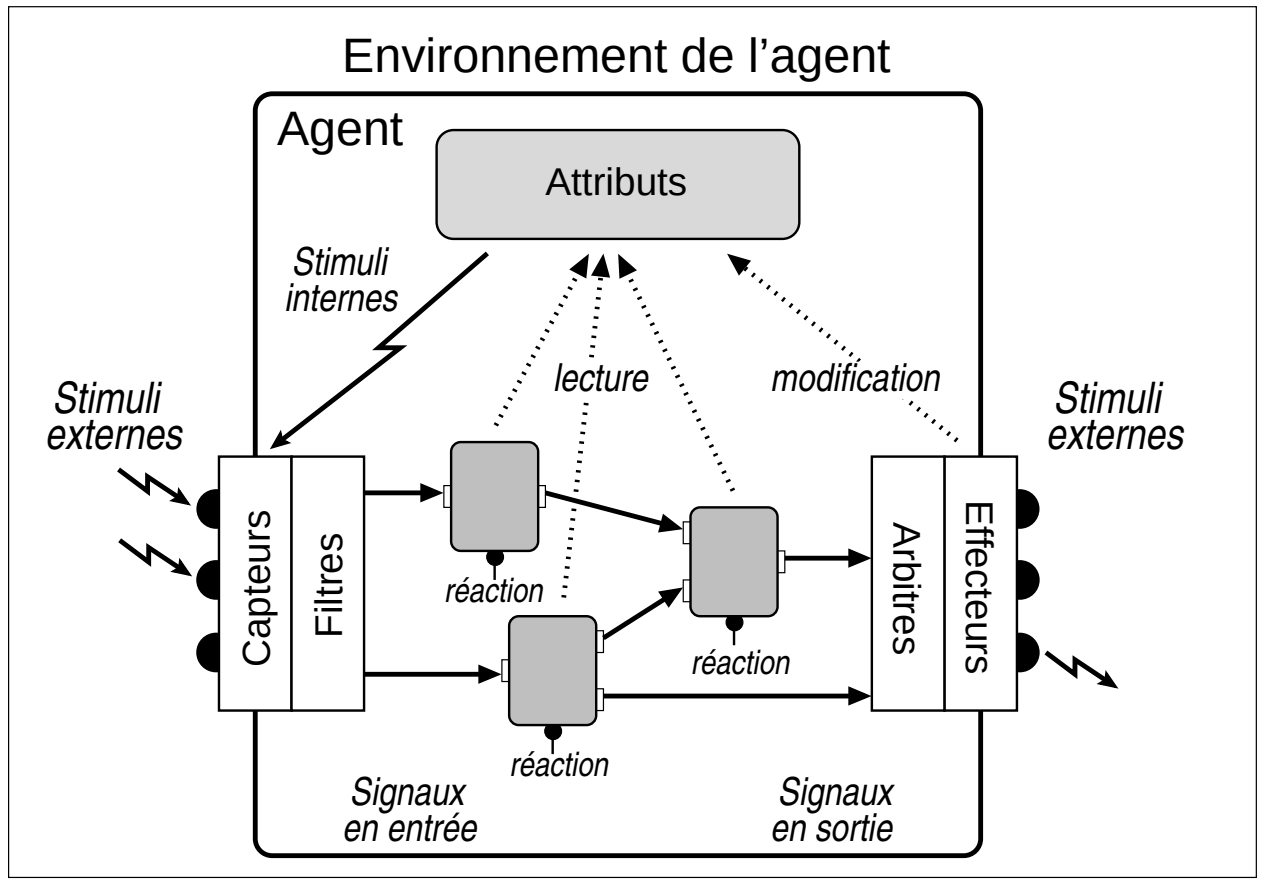
# Autres applications du modèle synchrone

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



# Autres applications du modèle synchrone

- 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/mimosa/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
```