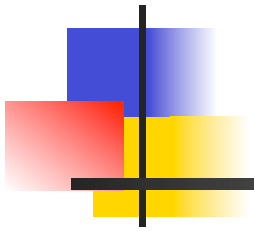


Ada, langage de programmation pour le temps réel

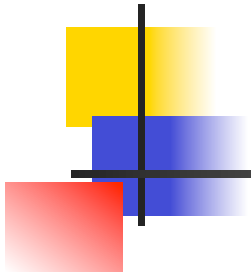
Laurent Pautet
Jérôme Hugues

Laurent.Pautet@enst.fr

Version 1.5

(tutorial Ada95 – http://www.enst.fr/~pautet/Ada95)

Des langages concurrents aux langages temps réel

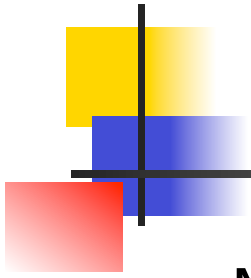


Un langage de programmation pour le temps réel doit faciliter la mise en œuvre de la concurrence

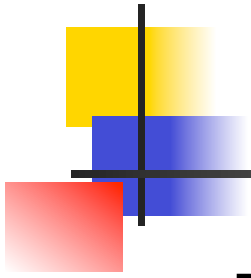
- Au travers de constructeurs du langage
  - Ada, Occam, ...
- Au travers de bibliothèques prédéfinies
  - Java, Modula, ...
- Au travers de bibliothèques du système
  - C ou C++ et Threads POSIX, ...

mais ce n'est pas suffisant

Programmation bas-niveau



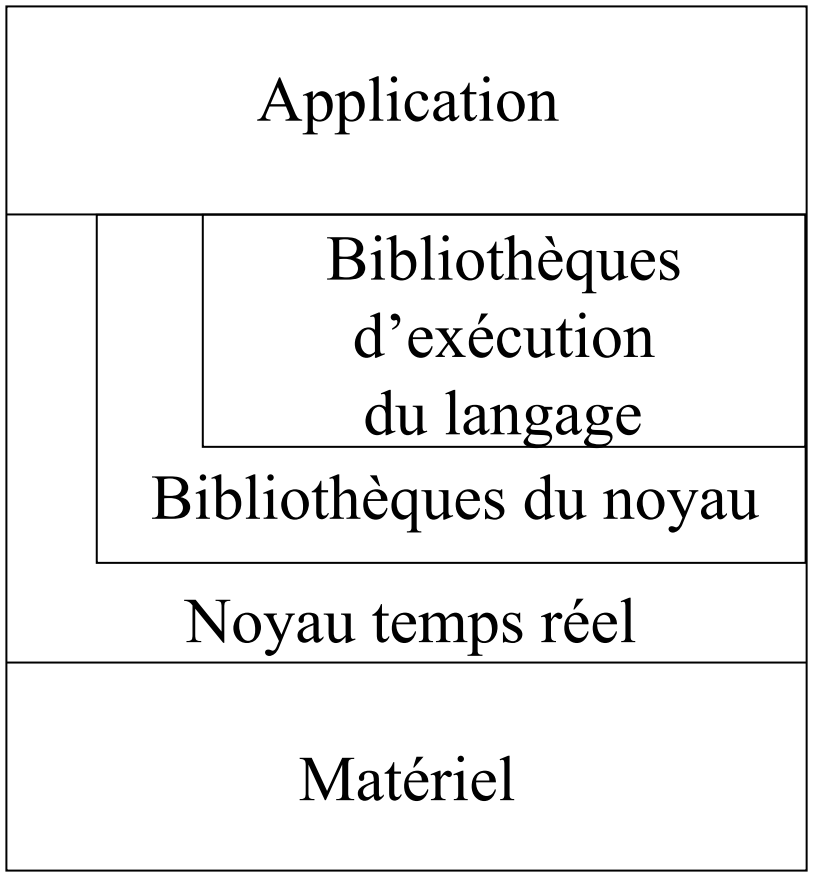
- Maîtrise sur le flot de contrôle
  - Pas de *goto*
  - Boucles non-bornées
  - Restriction sur les appels récursifs
  - Pas de fonctions à effet de bord
- Maîtrise sur les données
  - Typage fort nécessaire pour la fiabilité du code
  - Préférence pour les accès directs aux données
  - Structures très dynamiques
- Restrictions dès que les contraintes temporelles ou le déterminisme ne sont pas toujours garanties



Programmation haut-niveau

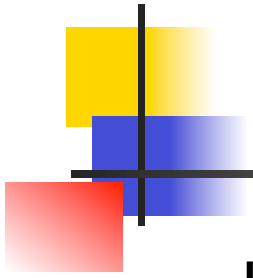
- Principes de Génie Logiciel extrêmement stricts
  - Forte sémantique => Forte vérification => Forte fiabilité
- Analyse et preuve de l'architecture et des composants
  - Restrictions sur le pré-processeur (quel code vraiment compilé?)
- Réutilisation maximum de modules existants prouvés
- Décomposition et tests de modules simples
- Visibilité des données (privées, publiques, ...)
- Restriction sur l'oriente objet
  - Peu de polymorphisme (calcul du pire cas)
  - Peu de structure dynamique (gestion mémoire)
- Gestion de configuration et du déploiement
  - Dépendances vis à vis du matériel et du système

Mise en œuvre d'un langage de programmation temps réel



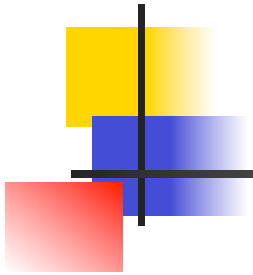
- Chaque couche, si elle existe, fournit un niveau d'abstraction
- Les constructions du langage sont étendues (*expansion*) par le compilateur pour utiliser celles de la biblio du langage ou celles de l'exécutif TR
- Exemples :
  - Tâche ⇔ Thread
  - Obj protégé ⇔ Mutex+CondVar
  - Delay ⇔ Timer

Avantages d'un langage de programmation temps réel



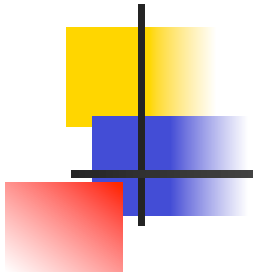
- Les bibliothèques fournissent une sémantique réduite et s'avèrent sources fréquentes d'erreurs
- Les constructions de langages fournissent plus de sémantiques et de richesses
- Le compilateur ne se trompent jamais dans l'expansion de ces constructions vers des bibliothèques
- Une forte sémantique permet de mener une analyse des sources ainsi que des vérifications formelles
- Un langage de programmation temps réel vient également avec des notions de typage fort, de visibilité, de précision sur les données (IEEE 754) …

Validation d'un compilateur Ada Cœur, Annexes et Profiles

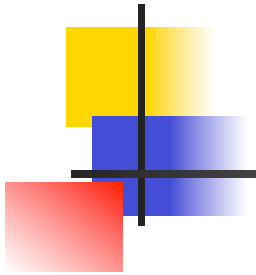


- Pour être qualifié de compilateur Ada, celui-ci doit passer un ensemble de tests qui vérifient exhaustivement le respect de la norme (et pas uniquement l'usage fait par les utilisateur)
- Le compilateur peut valider
  - Le cœur du langage
  - Puis les annexes spécialisées dont celle de temps réel
  - Puis les profiles spécialisées comme Ravenscar
- Chaque spécialisation définit un sous-ensemble du langage dont les restrictions améliore le déterminisme ou facilité l'obtention de preuves

Spécifications des annexes et profiles

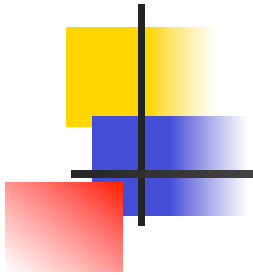


- Les pragmas sont des directives de compilation
  - ne changent pas la sémantique
  - mais en précisent ou restreignent l'usage général
- Les annexes et les profiles spécialisés pour le temps réel fournissent de nouveaux paquetages et définissent de nouveaux paquetages



Ada, annexes du langage

- Annexe des systèmes temps réel
  - Précision de l'horloge
  - Politiques d'ordonnancement, de files, de verrous
- Annexe de programmation système
  - Gestion des interruptions
  - Représentation des données
- Annexe de fiabilité et sécurité
  - Validation du code
- Annexe d'interfaçage avec les autres langages
  - Un système temps réel est rarement uni-langage



Définition des priorités

- Un environnement Ada doit fournir au moins 30 priorités dont une propre aux interruptions

```
subtype Any_Priority is Integer
   range Implementation-Defined;
subtype Priority is Any_Priority
   range Any_Priority'First .. Impl_Defined;
subtype Interrupt_Priority is Any_Priority
   range Priority'Last + 1 .. Any_Priority'Last;
Default_Priority : constant Priority :=
  (Priority'First + Priority'Last)/2;
```

Priorité statique des tâches

- Un pragma Priority ajouté à la spécification d'une tâche fixe statiquement la priorité initiale de la tâche

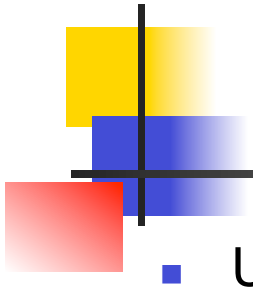
```
task Server is
   entry Service;
   pragma Priority (10);
end Server;

task Critical_Server is
   pragma Priority (Priority'Last);
end Critical_ Server;

task type Servers (My_Priority : System.Priority) is
   pragma Priority (My_Priority);
end Servers;
```

Priorité dynamique des tâches

- Le paquetage Ada.Dynamic_Priorities permet de modifier dynamiquement les priorités des tâches
- Attention : changer une priorité est une opération coûteuse pour tout exécutif

```
package Ada.Dynamic_Priorities is
   procedure Set_Priority
      (Priority : Any_Priority;
       T        : Task_Id := Current_Task);
  function Get_Priority
      (T : Task_Id = Current_Task)
      return Any_Priority;
private
  -- not specified by the language
end Ada.Dynamic_Priorities;
```

Héritage de priorité
Rendez-vous

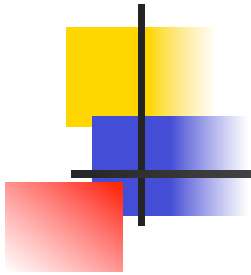


- Un rendez-vous s'exécute à la plus haute des priorités courantes de l'appelant et de l'appelé. Chacun retrouve sa priorité précédente
- Une tâche fille effectue son activation à la priorité courante de la tâche mère puis poursuit son exécution à sa priorité initiale pour éviter une inversion de priorité

```
task Server is
   entry Service;
   pragma Priority (10);
end Server;

task Critical_Server is
   pragma Priority
     (Priority'Last);
end Critical_ Server;
```

```
task body Critical_Server is
begin
   Server.Service;
end Critical_ Server;

task body Server is
begin
   accept Service do
      -- s'exécute à Priority'Last
   end Service;
end Server;
```

Héritage de priorité
Objet protégé



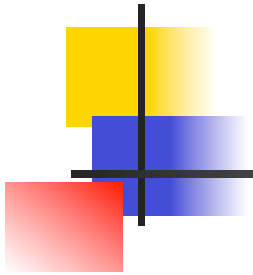
- Un objet protégé garantit une exclusion mutuelle sur l'objet
- Le pragma Priority ajouté à la spécification d'un objet protégé permet d'élever immédiatement la priorité de la tâche appelante à celle de l'objet protégé
- La priorité joue un rôle de plafond de priorité comme dans la politique Highest Priority Protocol, variante de PCP
- Si la priorité de la tâche appelante est supérieure à celle du plafond de priorité, l'exception Program_Error est levée puisque le plafond a été mal calculé
- Par défaut, le plafond de priorité est la plus haute des priorités de tâche, Priority'Last

Plafond de priorité

- Classiquement, une tâche T exécute au plafond de priorité une opération P sur l'objet protégé mais également celles des autres tâches qui se trouvent débloquées comme conséquence de P
- Si T_2 (priorité 16) est bloquée sur Altitude.Read et que T_1 (priorité 18) exécute Altitude.Write, T_1 se charge d'exécuter Altitude.Read à la priorité 20 pour T2 (moins de changement de contexte)

```
protected Altitude is
   entry Read
     (V : out Meter);
   procedure Write
     (V : Meter);
   pragma Priority (20);
private
   Value : Meter;
   Ready : Boolean
      := False;
end Altitude;
```

```
protected body Altitude is
   entry Read (V : out Meter)
      when Ready is
   begin
      V := Value; Ready := False;
   end Read;
   procedure Write (V : Meter) is
   begin
      Value := V; Ready := False;
   end Write;
end Altitude;
```

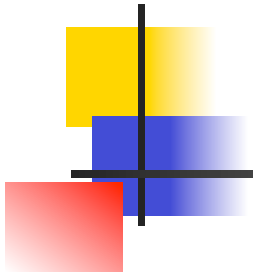


Politique de gestion de l'ordonnancement

pragma Task_Dispatching_Policy (FIFO_Within_Priorities);

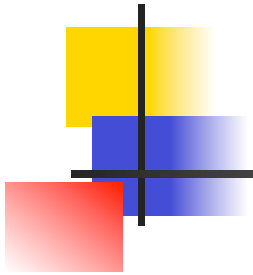
- La politique par défaut de gestion de l'ordonnancement est non-spécifiée (par exemple Time_Sharing)
- Le pragma Task_Dispatching_Policy force une politique de gestion de l'ordonnancement particulière
- Un environnement pour le temps réel doit proposer FIFO_Within_Priorities et éventuellement d'autres politiques
- FIFO_Within_Priorities spécifie les règles suivantes
  - On exécute la première tâche de la file plus haute priorité
  - Si une tâche devient prête, elle se place en fin de file
  - Si une tâche est interrompue, elle reste en début de file

Politique de gestion des files d'attente



pragma Queuing_Policy (FIFO_Queuing);

- La politique par défaut de gestion des files d'attente est FIFO_Queuing
- Le pragma Queuing_Policy force une politique de gestion des files d'attente particulière
- Un environnement pour le temps réel doit proposer FIFO_Queuing et surtout Priority_Queuing et éventuellement d'autres politiques
- Priority_Queuing spécifie les régles suivantes
  - Lorsqu'une entrée devient passante, la tâche de plus forte priorité est sélectionnée
  - En cas d'égalité de priorité, la première tâche dans l'ordre alphabétique est sélectionnée



Politique de gestion des verrous

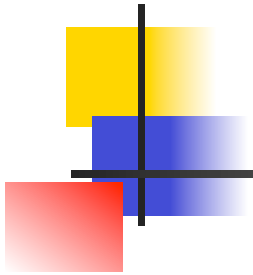
pragma Locking_Policy (Ceiling_Priority);

- La politique par défaut de gestion des verrous est non-spécifiée
- Le pragma Locking_Policy force une politique de gestion des verrous particulière
- Un environnement pour le temps réel doit proposer Ceiling_Priority et éventuellement d'autres politiques
- Ceiling_Priority spécifie les régles suivantes
  - Une tâche hérite du plafond de priorité (Priority'Last par défaut)
  - Si la tâche a une priorité supérieure, Program_Error est levée

Horloge temps réel

- Il faut disposer d'une horloge croissante monotone
  - Ada.Calendar (horloge normal)
  - Ada.Real_Time (horloge temps réel)
- Il faut disposer d'une horloge précise
  - Soit deux tâches l'une d'une période de 10ms et l'autre de 40ms
  - Elles peuvent ne pas être harmoniques (compensation)

```
Time_Unit = 2^-31
Millisecond (40) = 10100011110101110000101001O
                 = 0.04 + (21/25) * 2^-31
Millisecond (10) = 10100011110101110000101000
                 = 0.01 - (03/25) * 2^-31
Millisecond (10) * 4 - Millisecond (40) = 2^-30
```



Attente et échéance

- Il faut pouvoir suspendre une tâche pendant un temps d'attente ou jusqu'à une échéance
  - delay Temps_Relatif (attente normale)
  - delay until Temps_Absolu (attente temps réel)
- Le temps d'attente est un temps minimum
  - delay T : la tâche est réveillée après que ce soit écoulé au moins la durée T (résolution du timer)
  - delay until D : la tâche est réveillée à une date ultérieure (à la date D)
- delay until D # delay (D – Clock)
  - Car la soustraction peut être préemptée

Tâche périodique

```
task Normal_Sensor is
   pragma Priority (10);
end Normal_Sensor ;
task body Normal_Sensor
is
   use Ada.Real_Time;
   P : constant Time
     := Millisecond (40);
   D : Time := Clock + P;
begin
   loop
      -- Lit les capteurs
      delay D - Clock;
      D := D + P;
   end loop;
end Normal_Sensor ;
```

```
task Real_Time_Sensor is
   pragma Priority (10);
end Real_Time_Sensor;
task body Real_Time_Sensor
is
   use Ada.Real_Time;
   P : constant Time
     := Millisecond (40);
   D : Time := Clock + P;
begin
   loop
      -- Lit les capteurs
      delay until D;
      D := D + P;
   end loop;
end Real_Time_Sensor;
```

Chiens de garde

- Une tâche ne souhaite pas bloquer sur une entrée plus d'un certain temps
- Une tâche ne souhaite pas bloquer sur une entrée si elle ne l'obtient pas immédiatement

```
select
   A_Task.An_Entry;
or
   delay Timeout;
end select;
```

```
select
   A_Task.An_Entry;
else
   Do_Something;
end select;
```

Gestion des interruptions
Annexe de programmation système

```
protected Message_Driver is
   entry Get
      (M : out Message);
private
   Current : Message := None;
   procedure Handle;
   pragma Attach_Handler
      (Handle, Device_IT_Id);
   pragma Interrupt_Priority;
end Message_Driver ;
```

```
protected body Message_Driver is
   entry Get (M : out Message)
     when Current /= None is
   begin
      M := Current;
      Current := None;
   end Get;
   procedure Handle is
   begin
      if Current /= None then
         Report_Overflow;
      end if;
      Current := Read_Device;
   end Handle;
end Message_Driver ;
```

Contrôle de l'ordonnancement

Annexe de programmation système

- Par des interfaces comme POSIX, on peut accéder directement à l'ordonnancement et l'effectuer soi même
- En Ada, les paquetages Asynchronous_Task_Control et Task_Identication permettent d'avoir un contrôle fin.

```
package Task Identication is
   type Task_ID is private;
   function Current_Task
     return Task _D;
   procedure Abort_Task
     (T : in out Task_ID);
   …
end Task_Identication;
```

```
package Asynchronous_Task_Control is
   procedure Hold (T : Task ID);
   procedure Continue (T : Task ID);
   function Is_Held (T : Task ID)
      return Boolean;
end Asynchronous_Task_Control;
```

Représentation des données

Annexe de programmation système

- Il faut s'interfacer avec le matériel
- Même le langage C a ses limites (*bit fields*)

```
type Status is
   (Off, On, Busy);
for Status use
  (Off  => 0,
   On   => 1,
   Busy => 3);
for Status'Size use 2;
type Data is range 0 .. 127;
for Data'Size use 7;
type Register is record
   Send : Data;
   Recv : Data;
   Stat : Status;
end record;
```

```
for Register use record
   Send at 0 range 0 .. 6;
   Recv at 0 range 7 .. 13;
   Stat at 0 range 14 .. 15;
end record;

Device_Register : Register;
for Device_Register
   use at 8#100#;
```

Accès physique aux données

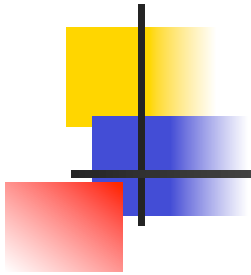
Annexe de programmation système

- pragma Volatile
  - L'objet est directement accèdé en mémoire
  - L'usage de cache et de registre est prohibé
  - La dernière valeur écrite correspond à la valeur lue
- pragma Atomic
  - L'objet est toujours accédé de manière atomique
  - Les opérations sur de petits objets ne sont pas toujours atomiques

```
package Shared_Buffer is
   Buffer_Array : array (0 .. 1023) of Character;
   pragma Volatile_Components (Buffer_Array);
   Next_In, Next_Out : Integer := 0;
   pragma Atomic (Next_In, Next_Out);
end Shared_Buffer;
```

Validation du logiciel

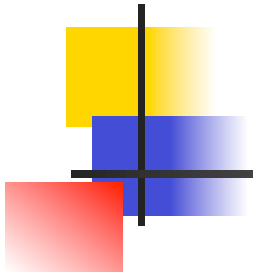
Annexe de fiabilité et sécurité



- pragma Reviewable;
  - Ce pragma demande au compilateur d'annoter son code et de fournir des informations telles que l'on puisse déterminer le temps d'exécution, l'utilisation de la mémoire, etc.
- pragma Inspection_Point (V);
  - Ce pragma demande au compilateur de rendre la variable V accessible à l'endroit où se trouve le pragma. A priori, le compilateur ne pourra pas garder la variable dans des registres et devra également éviter d'optimiser ces modifications sur la variable à cet endroit précis.

Efficacité du logiciel

Annexe de fiabilité et sécurité



- pragma Suppress (…);
  - Ce pragma demande au compilateur de supprimer certaines voire toutes les vérifications qu'il peut effectuer implicitement sur les contraintes de type, sur les contraintes de bornes de tableau, etc.
- De nombreux pragmas permettent d'inhiber les vérifications que le compilateur génère normalement pour l'utilisateur. Toutefois, si le logiciel a été sévèrement testé, certaines vérifications deviennent inutiles et peuvent ainsi être élégamment supprimées.

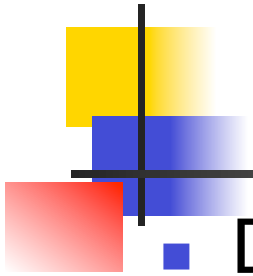
Vers les autres langages

Annexe d'interfaçage

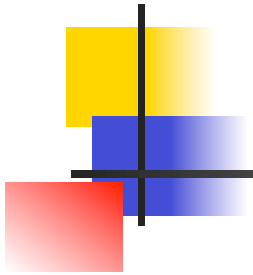
- Un système est multi-langages
  - S'interfacer facilement avec d'autres langages
  - S'assurer d'une certaine interopérabilité
  - Contrôler
    - Le passage des paramètres,
    - La représentation des données
    - Le caractère réentrant des fonctions
- Ada offre des interfaces vers les types prédéfinis de divers langages C, COBOL, FORTRAN, etc.

```
function Gethostbyname (Name : in C.Address)
   return Host_Entry_Address;
pragma Import (C, Gethosbytname, "gethostbyname");
```

Restrictions sur les constructions du langage

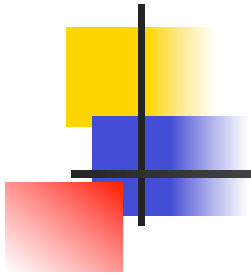


- Dès lors, aucun développeur n'utilise des points interdits du langage dans le système temps réel
  - pragma Restrictions (No Task Allocator);
    - -- No allocators for task types
  - pragma Restrictions (No Task Hierarchy);
    - -- All tasks depend directly from env. task ...
  - pragma Restrictions (No Allocator);
    - -- There are no occurrences of an allocator
  - pragma Restrictions (No Recursion);
    - -- As part of the execution of a subprogram,
    - -- the same subprogram is not invoked
  - pragma Restrictions (No Dispatch);
  - ...



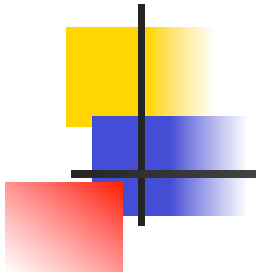
Profil Ravenscar

- Sous-ensemble des constructions concurrentes:
  - Ada (Ada 0Y) et Java (RTJS)
- Conçu pour permettre une analyse complète d'une application temps réel
  - Déterminisme de l'exécution
  - Ordonnancement
  - Empreinte mémoire bornée
- Possibilité de définir des exécutifs légers
- Possibilité de vérification statique et certification
  - Flux de données, preuves formelles



Objectifs généraux du profil Ravenscar

- Une règle: supprimer tout comportement dynamique non déterministe
- Ordonnanceur RMS: FIFO_Within_Priorities
  - Techniques d'analyse
- Politique de verrous: Ceiling_Locking
  - Calcul du WCET lors d'interblocage
- Pas d'allocation implicite sur la pile
- Pas de délais relatifs



Modèle de tâches réduit

- Pré-allocation statique de tâches
  - Pas d'allocation dynamique de tâches
- Pas de hiérarchie de tâches
- Pas d'avortement
- Pas de finalisation
- Pas de finalisation
  - Analyse facilitée du cycle de vie d'une tâche

Boîte aux lettres avec priorité 1/2

Solution avec requeue

```
type Prioritized_Messages is
   array (Any_Priority) of Messages;
protected Prioritized_Mailbox is
   procedure Put (M : Message; P : Any_Priority);
   entry Get (M : out Message; P : Any_Priority);
private
   Mailbox  : Prioritized_Messages;
   Updating : Boolean := False;
   entry Wait (M : out Message; P : Any_Priority);
end Prioritized_Mailbox;

protected Prioritized_Mailbox is
   procedure Put (M : Message; P : Any_Priority) is
   begin
      Append (Mailbox (P), M);
      if Wait'Count /= 0 then
         Updating := True;
      end if;
   end Put;
```

Boîte aux lettres avec priorité 2/2

Problème de déterminisme

```
   entry Get (M : out Message; P : Any_Priority)
      when not Updating is
   begin
      if Length (Mailbox (P)) = 0 then
         requeue Wait;
      end if;
      Extract (Mailbox (P), M);
   end Get;

   entry Wait (M : out Message; P : Any_Priority)
      when Updating is
   begin
      if Wait'Count = 0 then
         Updating := False;
      end if;
      requeue Get;
   end Get;
end Prioritized_Mailbox;
```

Boîte aux lettres avec priorité 1/2

Solution avec familles d'entrée

```
protected Prioritized_Mailbox is
   procedure Put (M : Message; P : Any_Priority);
   entry Get (M : out Message; P : Any_Priority);
private
   Mailbox : Prioritized_Messages;
   entry Wait (Any_Priority)
     (M : out Message; P : Any_Priority);
end Prioritized_Mailbox;

protected Prioritized_Mailbox is
   procedure Put (M : Message; P : Any_Priority) is
   begin
      Append (Mailbox (P), M);
   end Put;
```

Boîte aux lettres avec priorité 2/2

```
   entry Get (M : out Message; P : Any_Priority)
      when True is
   begin
      if Length (Mailbox (P)) = 0 then
         requeue Wait (P);
      end if;
      Extract (Mailbox (P), M);
   end Get;

   entry Wait (for A in Any_Priority)
     (M : out Message; P : Any_Priority)
      when Length (Mailbox (A)) > 0 is
   begin
      Extract (Mailbox (P), M);
   end Get;
end Prioritized_Mailbox;
```