
Calcul haute performance : notions de base (HPC)

Cours 1 : MPI, une bibliothèque de communication par échange de messages

P. Fortin – Sorbonne Université

M1 Info SFPN / MAIN4

(d'après le cours de J.-L. Lamotte)

Qu'est-ce que MPI ?

- *Message Passing Interface* : standard d'interface de bibliothèque de communication et d'environnement parallèle, permettant de faire communiquer par échange de messages des processus
 - ▶ distants
 - ▶ sur des machines qui peuvent être hétérogènes
- Pour des applications écrites en C, en C++ ou en Fortran
- Historique :
 - ▶ PVM : *Parallel Virtual Machine*
 - ▶ MPI-1 : 1994
 - ▶ MPI-1.2 : clarification du standard MPI-1 (→ version utilisée en TP)
 - ▶ MPI-2 : 1997 (MPI-2.1 en 2008, MPI-2.2 en 2009)
 - ▶ MPI-3 : 2012
- Exemples d'implémentations :
 - ▶ domaine public : LAM, MPICH, OpenMPI
 - ▶ implémentations constructeurs : IBM, SUN...

Qu'est-ce qu'il y a dans MPI ?

- Des communications point-à-point
 - ▶ plusieurs modes de communication
 - ▶ support pour les buffers structurés et les types dérivés
 - ▶ support pour l'hétérogénéité
- Routines de communications collectives
 - ▶ Communications dans un « groupe » ou un « sous-groupe » de processus
 - ▶ Opérations pré-définies ou définies par l'utilisateur

Comment programmer sous MPI?

- Chaque processus a son propre flot de contrôle et son propre espace d'adressage (→ MIMD)
 - ▶ mais tous les affichages sont renvoyés sur la machine locale
- Modèles de programmation possibles : SPMD ou MPMD
- Utilisation d'une représentation interne des données
 - ▶ masque l'hétérogénéité
- Gestion de la communication par l'intermédiaire des routines de la librairie
 - ▶ Les noms des routines MPI débutent par « MPI_ »;

Primitives de Bases

- Pour **l'initialisation**, on utilise la primitive `MPI_Init` qui doit être la première fonction MPI appelée :

```
int MPI_Init(int* argc, char*** argv);
```

- Pour **sortir de MPI**, on utilise `MPI_Finalize` qui doit être la dernière fonction MPI appelée. Cette primitive doit être impérativement appelée par tous les processus.

```
int MPI_Finalize();
```

Notion de communicateur

- Type **MPI_Comm**
- Un ensemble statique de processus qui se connaissent.
 - ▶ Peut être créé ou détruit en cours d'application
 - ▶ Tous les processus d'un communicateur ont un **rang** différent, compris entre 0 et $P-1$ (où P est le nombre de processus dans le communicateur)
- Chaque communication MPI a lieu par rapport à un communicateur.
 - ▶ Définit les processus concernés par la communication
 - ▶ Utile pour les communications collectives
- Un processus peut appartenir à plusieurs communicateurs
 - ▶ Peut avoir un rang différent dans chaque communicateur
- **MPI_COMM_WORLD** est un communicateur prédéfini qui contient tous les processus

Primitives de Bases

- Combien de processus y a-t-il dans le communicateur ?

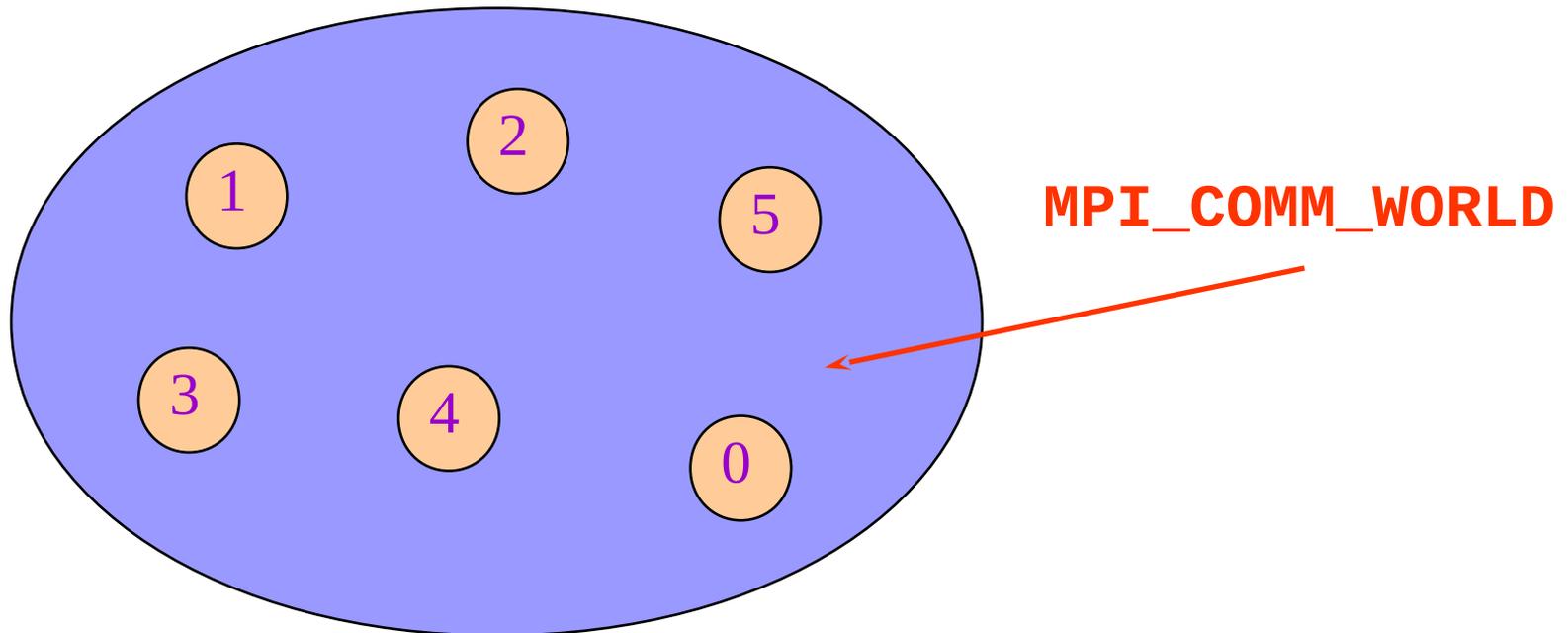
```
int MPI_Comm_size(MPI_Comm comm, int *size);
```

- Qui suis-je ?

```
int MPI_Comm_rank(MPI_Comm comm, int* rank);
```

MPI_COMM_WORLD

- Le communicateur **MPI_COMM_WORLD** contient tous les processus démarrés (statique en MPI-1).
- Chaque processus possède un rang unique dans **MPI_COMM_WORLD**.



Structure d'un message sous MPI

- Un message est divisé en une zone de données et une enveloppe :
 - ▶ Les données :
 - adresse du buffer ;
 - nombre d'éléments ;
 - type (pour masquer l'hétérogénéité).
 - ▶ L'enveloppe :
 - rang (identité) du processus
 - pour les envois : indique le destinataire ;
 - pour les réceptions : indique l'expéditeur ;
 - étiquette du message (tag) ;
 - communicateur.

Comment typer les messages ?

- L'étiquette du message : **int tag**
- Permet de séparer données et contrôle
- Valeur d'un tag : 0 .. UB (*Upper Bound*)
 - ▶ MPI garantit que $UB \geq 32\,767$
 - ▶ LAM sur Linux : $UB = 134\,973\,172$
- Un processus peut se mettre en attente d'un message de tag donné
 - ▶ le tag du message attendu doit être égal au tag d'un message reçu (qui n'est pas forcément le premier message reçu)
- Un processus peut se mettre en attente d'un message de tag quelconque : **MPI_ANY_TAG**

Contenu des messages MPI

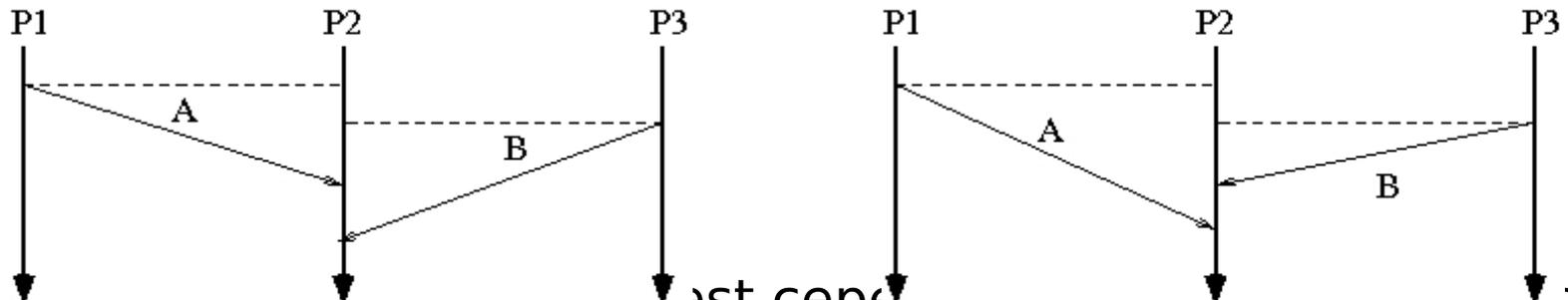
- Vous pouvez avoir
 - ▶ des types élémentaires,
 - ▶ des tableaux de types élémentaires,
 - ▶ des zones contiguës de données,
 - ▶ des blocs de types avec saut,
 - ▶ des structures,
 - ▶ ...
- Construction (éventuellement récursive) de ces types dérivés, puis enregistrement avec `MPI_Type_commit` (et destruction avec `MPI_Type_free`), par tous les processus.
- Création des types dérivés à l'exécution → peuvent dépendre des paramètres de l'application.

Types de données élémentaires

MPI	C
MPI_CHAR	signed char
MPI_SHORT	signed short
MPI_INT	signed int
MPI_LONG	signed long
MPI_UNSIGNED_CHAR	unsigned char
MPI_UNSIGNED_SHORT	unsigned short
MPI_UNSIGNED	unsigned int
MPI_UNSIGNED_LONG	unsigned long
MPI_FLOAT	float
MPI_DOUBLE	double
MPI_LONG_DOUBLE	long double

Les communications MPI

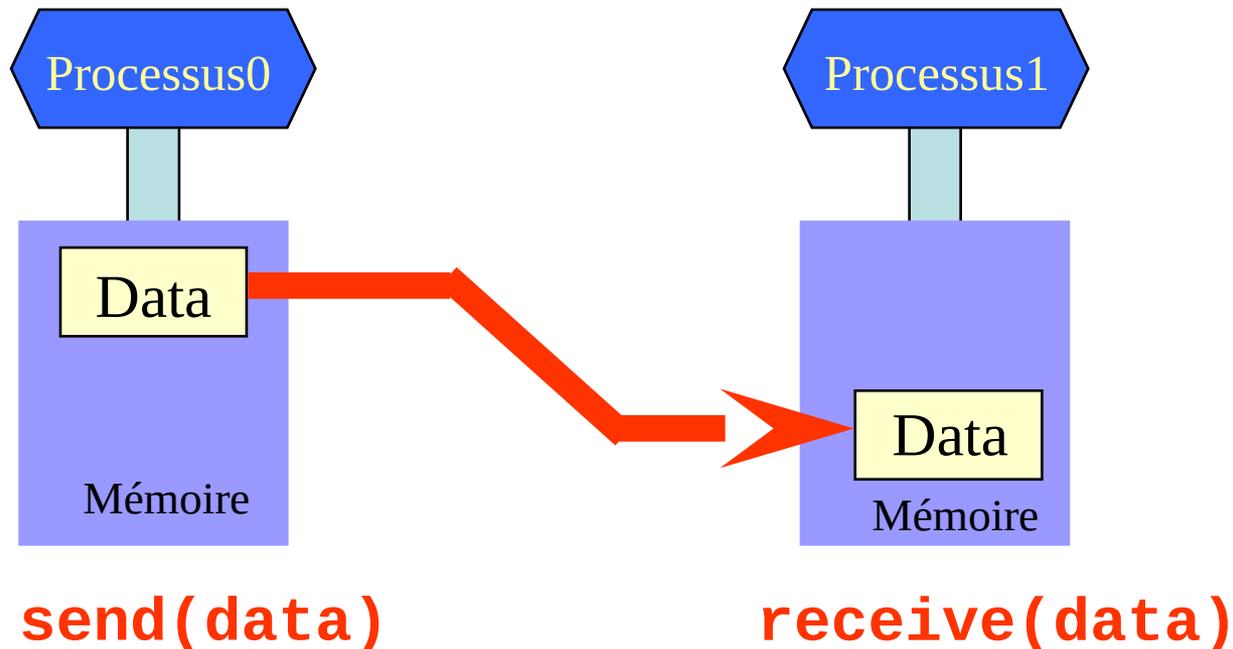
- Communications **fiables**
 - ▶ tout message émis est reçu exactement une fois (ni perte, ni duplication)
- Communications **FIFO** (*First In - First Out*)
 - ▶ pour tout couple de processus (P_i, P_j) : pour tout couple (m, m') de messages émis par P_i à destination de P_j :
 - si m est envoyé avant m' , alors m est reçu avant m'
 - ▶ cette condition ne s'applique pas si les destinataires (ou les émetteurs) sont différents → système **non déterministe**, plusieurs exécutions possibles :



- Le ordre de réception n'est cependant pas dû à une cause des étiquettes (voir plus loin).

La communication point-à-point

- Forme la plus simple de communication.



```
send(buffer, size, [tag], destination)
receive(buffer, buffer_size, [tag], [source])
```

Sous-ensemble MPI-1

- Il suffit de 6 routines pour écrire des programmes MPI simples :

MPI_Init(...)

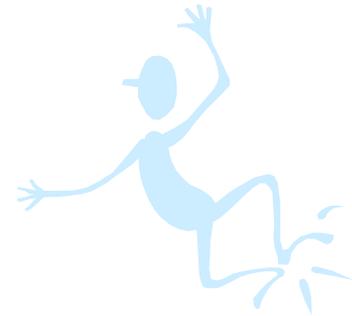
MPI_Comm_size(...)

MPI_Comm_rank(...)

MPI_Send(...)

MPI_Recv(...)

MPI_Finalize()



MPI est simple!

Exemple (avec 2 processus)

```
#include <mpi.h>
int main(int argc, char *argv[]){
    char msg[20];
    int my_rank;
    MPI_Status status;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &my_rank);

    if (my_rank == 0) { /* Hi! I'm process 0! */
        strcpy(msg, "Hello C world !");
        MPI_Send(msg, strlen(msg)+1, MPI_CHAR, 1 /* destinataire */,
                 99 /* tag */, MPI_COMM_WORLD);
    }
    else {
        MPI_Recv(msg, 20, MPI_CHAR, 0 /* emetteur */,
                99 /* tag*/, MPI_COMM_WORLD, &status);
        printf("I received %s!\n", msg);
    }
    MPI_Finalize();
}
```

MPI : modes de communication

- Opération à réaliser :
 - ▶ envoi par P0 du contenu du buffer A
 - ▶ réception par P1 des données et stockage dans un buffer B
- Options :
 - ▶ communication synchrone / asynchrone
 - ▶ communication bloquante / non bloquante

Communications bloquantes

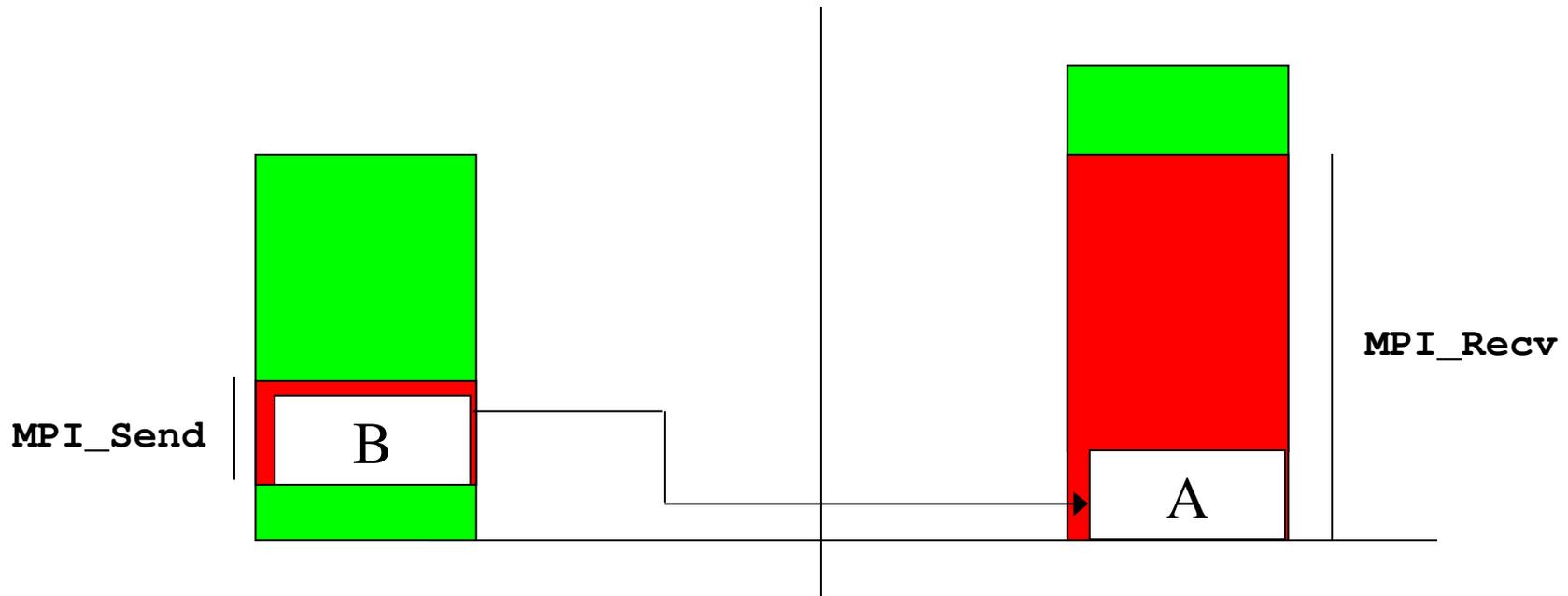
- Emission :
 - ▶ Lorsque l'émission se termine, le buffer qui contenait les données envoyées peut être réutilisé.
 - ▶ Dans le cas général, rien n'indique que les données aient été effectivement reçues par le destinataire.
- Réception :
 - ▶ Lorsque la réception se termine, les données sont disponibles dans le buffer du destinataire.

Communications non bloquantes

- La primitive se termine (retourne)
« immédiatement »
 - ▶ Lorsqu'une émission non bloquante retourne, les données n'ont pas forcément été extraites du buffer d'émission.
 - ▶ Lorsqu'une réception non bloquante retourne, le buffer de réception n'a pas forcément été rempli.
- Nécessité de vérifier que la communication s'est terminée avant de (ré)utiliser le buffer
 - ▶ Primitives de test et d'attente : `MPI_Test()`, `MPI_Wait()`
- Primitive terminée \neq communication terminée !

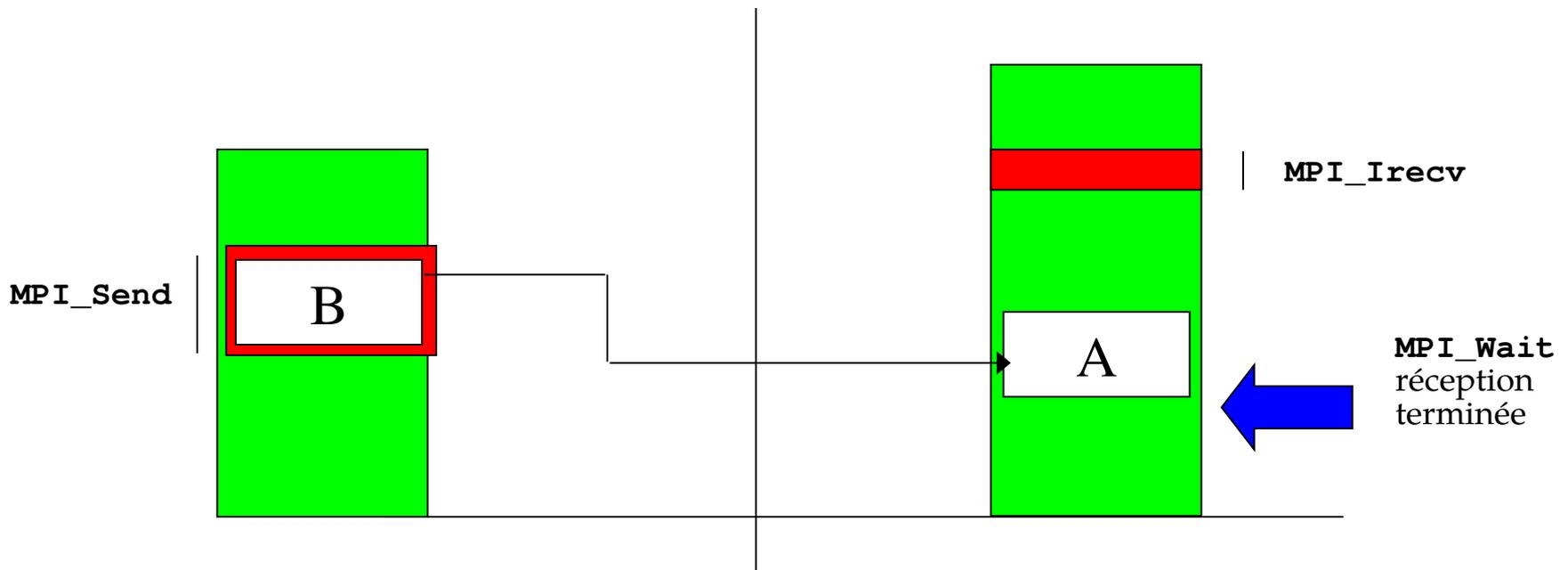
Réception bloquante MPI_Recv

- MPI_Recv retourne quand le transfert est terminé



Réception non bloquante MPI_Irecv

- MPI_Irecv() peut retourner avant même le début du transfert
- MPI_Wait() retourne quand le transfert est terminé

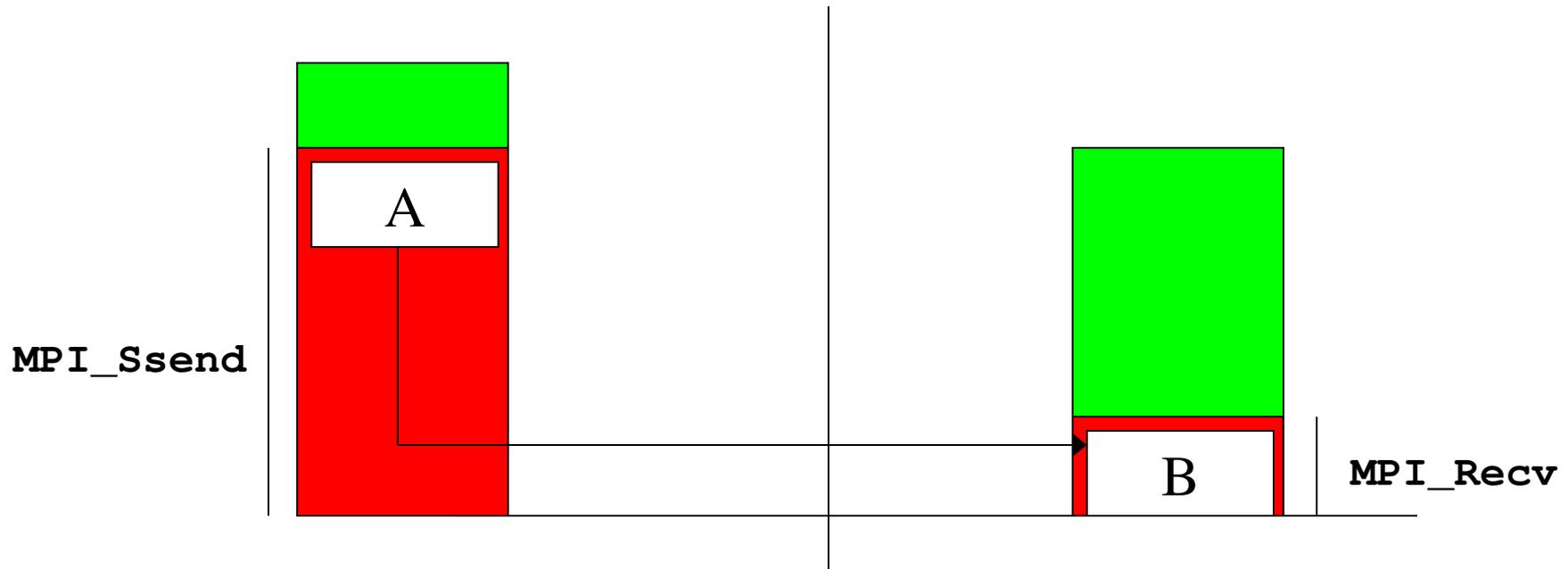


Emission synchrone ou standard

- Emission **synchrone** : terminée quand les données sont entièrement reçues par le destinataire
- Emission **standard** : terminée quand les données sont complètement :
 - ▶ soit reçues par le destinataire (mode synchrone ou « **rendez-vous** »)
 - ▶ soit transférées dans un tampon système intermédiaire (mode « **envoi immédiat** »)
- Emission standard - **attention** :
 - ▶ l'utilisation du tampon intermédiaire dépend de l'implémentation MPI, **et des conditions courantes** d'exécution de l'application
 - ▶ man MPI_Send LAM : This function **may** block until the message is received. Whether or not MPI_Send blocks depends on factors such as how large the message is, how many messages are pending to the specific destination, etc.
 - ▶ En général : messages courts → envoi immédiat
messages longs → mode rendez-vous

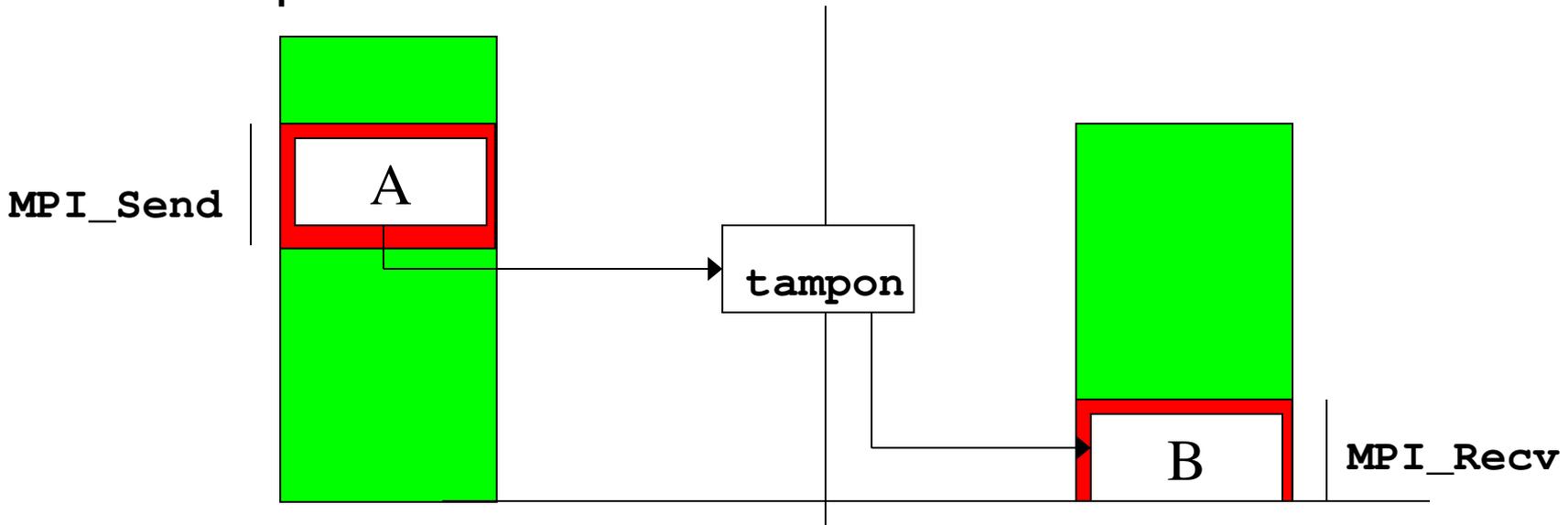
Emission bloquante synchrone : MPI_Ssend

- MPI_Ssend() retourne quand les données sont entièrement reçues par le destinataire
- Niveau MPI : pas besoin de tampon intermédiaire, attendre que le récepteur soit prêt pour transférer



Emission bloquante standard : MPI_Send

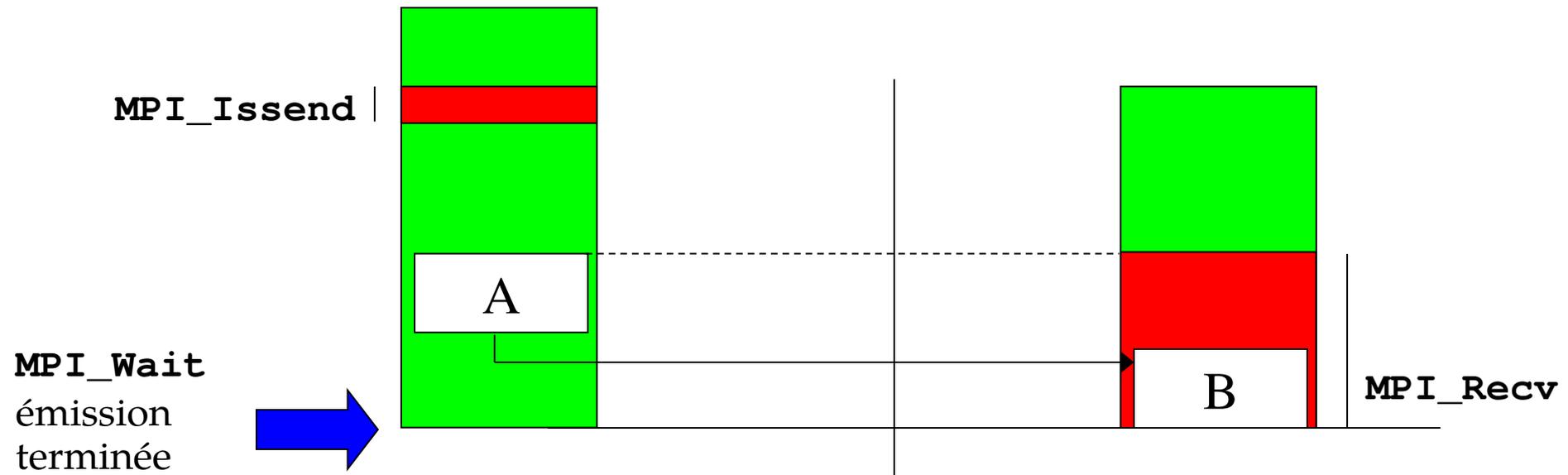
- MPI_Send() retourne quand les données sont reçues ou copiées dans un tampon intermédiaire
- Niveau MPI : utiliser un tampon intermédiaire, s'il peut contenir les données



Exemple avec tampon intermédiaire

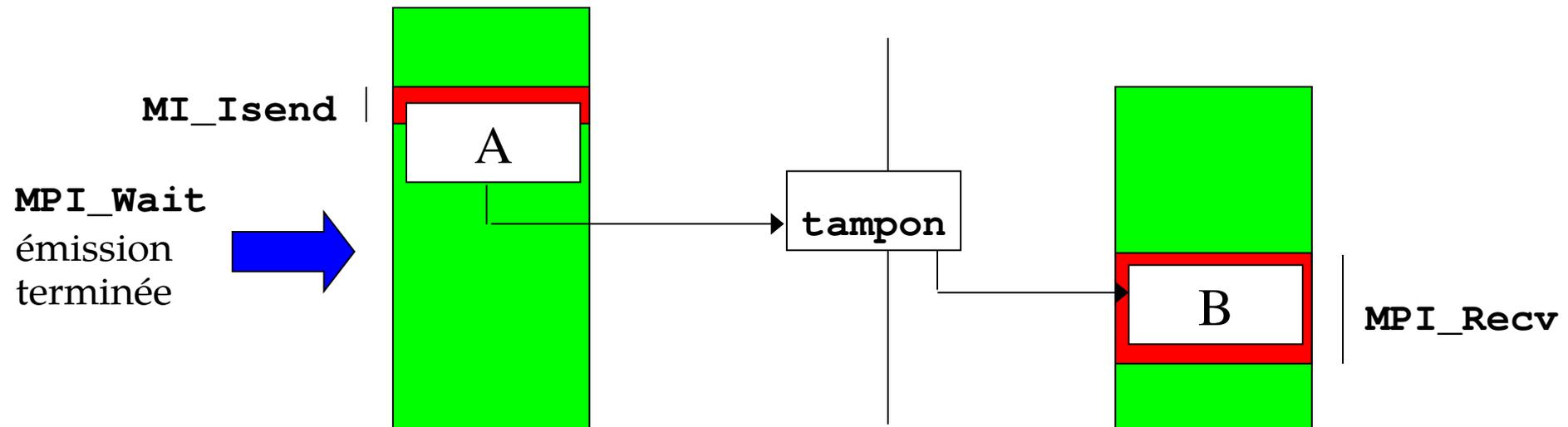
Emission non bloquante synchrone : MPI_Issend

- MPI_Issend() peut retourner avant même le début du transfert
- MPI_Wait() retourne quand les données sont complètement reçues par le destinataire



Emission non bloquante standard : MPI_Isend

- MPI_Isend() peut retourner avant même le début du transfert ou la copie dans le tampon intermédiaire
- MPI_Wait() retourne quand les données sont complètement reçues par le destinataire ou copiées dans le tampon intermédiaire



Exemple avec tampon intermédiaire

Synchrone ou standard ?

- Emission synchrone

- ▶ Pas besoin de tampon système :
 - pas de recopie intermédiaire, pas d'utilisation mémoire supplémentaire
- ▶ A éviter si l'on ne sait pas du tout quand sera exécuté un Recv :
 - l'émetteur risque d'être bloqué longtemps, inter-blocages (deadlocks) possibles...

- Emission standard

- ▶ Ne se distingue de l'émission synchrone que si la bufferisation est effective
- ▶ Le mode « envoi immédiat »
 - permet de ne pas attendre le déclenchement de la réception par le destinataire → *poursuite des calculs applicatifs*
 - mais consommation de ressources système :
 - taille des tampons intermédiaires en mémoire
 - temps CPU pour les copies vers/depuis les tampons intermédiaires
- ▶ Se renseigner sur l'implémentation MPI, étudier la taille et le nombre des messages de l'application

Les primitives MPI

- Emission :
 - ▶ MPI_Ssend : synchrone bloquant
 - ▶ MPI_Send : standard bloquant
 - ▶ MPI_Issend : synchrone non-bloquant
 - ▶ MPI_Isend : standard non-bloquant

- Réception :
 - ▶ MPI_Recv: standard bloquant
 - ▶ MPI_Irecv: standard non-bloquant

- Les primitives non-bloquantes mobilisent beaucoup de ressources système
 - ▶ A n'utiliser que s'il y a de bonnes possibilités de recouvrement des communications par le calcul

Emission : les paramètres

- Emission bloquante : **Send** et **Ssend**
 - ▶ L'adresse de début de la zone d'émission : void* buf
 - ▶ Le nombre de données envoyées : int nb
 - ▶ Le type des données (homogènes) : MPI_Datatype dtype
 - ▶ L'identité du destinataire : int dest
 - ▶ L'étiquette du message : int tag
 - ▶ Le communicateur : MPI_Comm comm
- Emission non bloquante : **Isend** et **Issend**
 - ▶ En plus des paramètres ci-dessus, un identificateur de requête (paramètre de sortie) : MPI_Request *req
 - pour identifier par la suite l'émission dont on testera la terminaison

Réception : les paramètres

- Réception bloquante : **Recv** :
 - ▶ L'adresse de début de la zone de réception : void* buf
 - ▶ La taille de 'buf' en nombre de données de type 'dtype' : int nb
 - ▶ Le type des données (homogènes) : MPI_Datatype dtype
 - ▶ L'identité de l'émetteur : int source
 - ▶ L'étiquette du message : int tag
 - ▶ Le communicateur : MPI_Comm comm
 - ▶ Les informations complémentaires : MPI_Status *status
- Réception non bloquante : **IRecv**
 - ▶ En plus des paramètres ci-dessus, un identificateur de requête (paramètre de sortie) : MPI_Request *req
 - pour identifier par la suite la réception dont on testera la terminaison
 - ▶ Pas de 'status' en non bloquant : affecté seulement lorsque la réception est effective (voir MPI_Wait)

Les « jokers »

- Pour recevoir un message dont on ne connaît pas l'émetteur a priori
 - ▶ MPI_ANY_SOURCE
- Pour recevoir un message dont on ne connaît pas l'étiquette a priori
 - ▶ MPI_ANY_TAG
- Dans ce cas, possibilité de récupérer l'identité de l'émetteur ou l'étiquette du message à travers le « status »

L'objet Status

- Pour obtenir des informations sur le message après réception
- Structure de type prédéfini **MPI_Status**
 - ▶ accès à la valeur de l'étiquette (tag) : **status.MPI_TAG**
 - ▶ accès à l'identité de l'émetteur : **status.MPI_SOURCE**
- Peut être interrogé par l'intermédiaire d'une routine
 - ▶ **MPI_Get_count** (&status, datatype, &count);
 - renvoie dans **count** le nombre d'objets de type `datatype` reçus

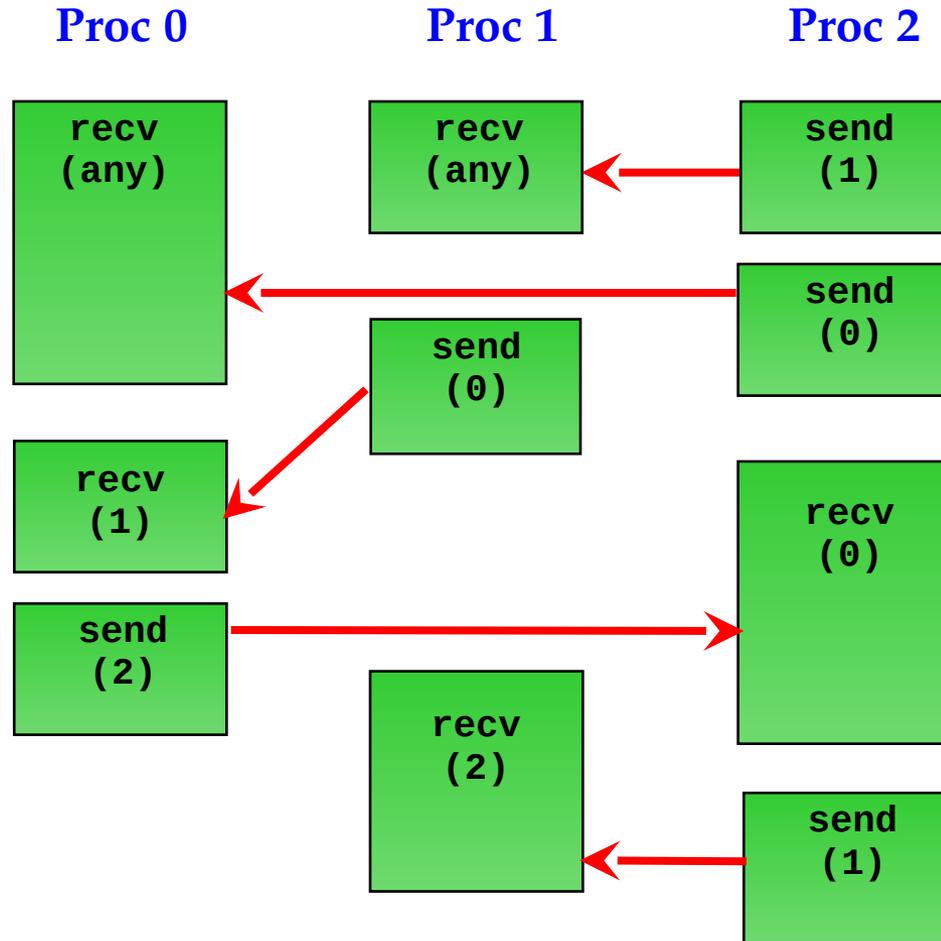
Exemple 2 (avec 3 processus)

```
int main(int argc, char *argv[]){
    int msg = 2;
    int my_rank;
    MPI_Status status;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &my_rank);

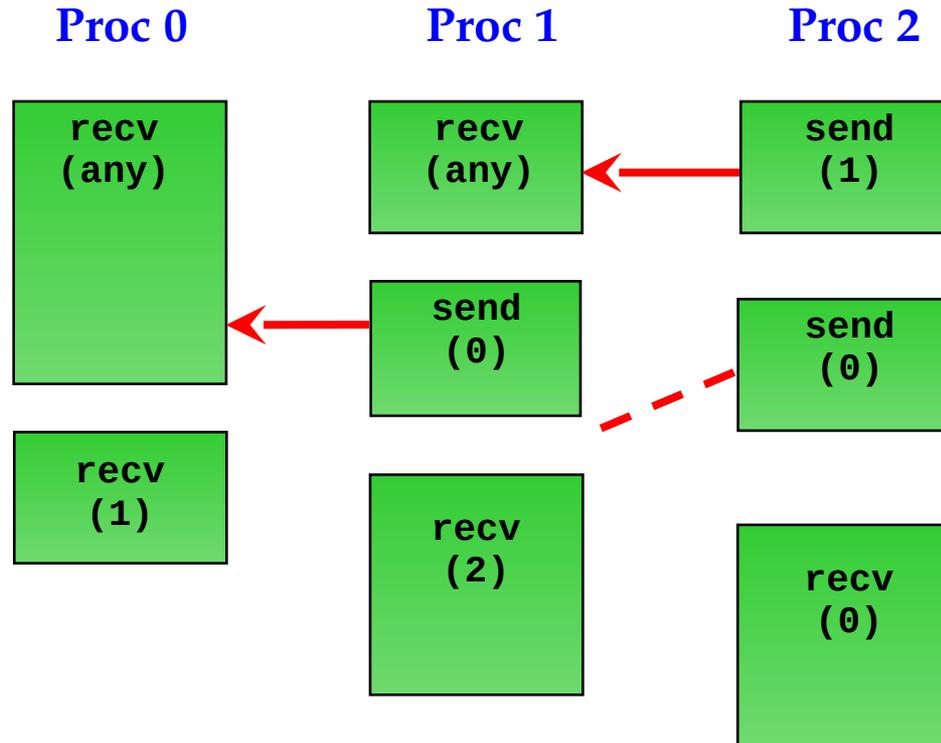
    if (my_rank == 0) { /* Hi! I'm process 0! */
        MPI_Recv(&msg, 1, MPI_INT, MPI_ANY_SOURCE, 99,
                MPI_COMM_WORLD, &status);
        printf("Hello %d !\n", status.MPI_SOURCE);
        MPI_Recv(&msg, 1, MPI_INT, MPI_ANY_SOURCE, 99,
                MPI_COMM_WORLD, &status);
        printf("Hello %d !\n", status.MPI_SOURCE);
    } else {
        MPI_Send(&msg, 1, MPI_INT, 0, 99, MPI_COMM_WORLD);
    }
    MPI_Finalize();
}
```

Attention aux blocages...



Exécution OK

Ca peut arriver !



Blocage !

Fin de communication non-bloquante

- Tester l'arrivée du message
 - ▶ Le message que j'ai envoyé a-t-il été transmis ?
 - ▶ Le message que j'attends est-il arrivé ?

`MPI_Test(MPI_Request *req, int *flag, MPI_Status *status)`

- ▶ 'req' identifie la communication
- ▶ 'flag' donne la réponse :
 - *flag = 1 : la communication est terminée
 - *flag = 0 : la communication est en cours

- Attendre l'arrivée du message :

`MPI_Wait(MPI_Request *req, MPI_Status *status)`

Exemple 3 (avec 2 processus)

```
#include <mpi.h>
int main(int argc, char **argv) {
    char msg[20];int my_rank;
    MPI_Status status; MPI_Request request;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &my_rank);
    if (my_rank == 0) { /*-- process 0 --*/
        sleep(5);
        strcpy(msg, "Hello world !");
        MPI_Send(msg, strlen(msg)+1, MPI_CHAR, 1, 7, MPI_COMM_WORLD);
    } else {
        MPI_Irecv(msg, 20, MPI_CHAR, 0, 7, MPI_COMM_WORLD, &request);
        sleep(1); /* je fais autre chose, du calcul par exemple */
        MPI_Wait(&request, &status);
        printf("Je recois : %s\n", msg);
    }
    MPI_Finalize();
}
```

Test du contenu d'un message

- Utile si le contenu du message dépend
 - ▶ De l'émetteur
 - ▶ Ou de l'étiquette
 - ▶ Ou des deux...

```
MPI_Probe(int source, int tag, MPI_Comm com,
```

- On utilise le `status` pour identifier le message (si jokers) et/ou définir une zone de réception de la taille exactement nécessaire :

```
MPI_Status *status)  
MPI_Probe -> status -> MPI_Get_count -> malloc ->  
MPI_Recv
```

- Existe aussi en non-bloquant :

```
MPI_Iprobe(int source, int tag, MPI_Comm com,  
           int *flag, MPI_Status *status)
```

Le buffer n'est pas une file...

```
int main(int argc, char *argv[]){
    int msg = 3;
    int my_rank;
    MPI_Status status;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &my_rank);
    if (my_rank == 0) { /* Hi! I'm process 0! */
        MPI_Send(&msg, 1, MPI_INT, 1, 98, MPI_COMM_WORLD);
        msg = 5;
        MPI_Send(&msg, 1, MPI_INT, 1, 99, MPI_COMM_WORLD);
    } else {
        MPI_Recv(&msg, 1, MPI_INT, 0, 99, MPI_COMM_WORLD, &status);
        printf("I received %d \n", msg);
        MPI_Recv(&msg, 1, MPI_INT, 0, 98, MPI_COMM_WORLD, &status);
        printf("I received %d \n", msg);
    }
    MPI_Finalize();
}
```

Programme et exécution corrects !

(pas d'inter-blocage car messages courts :
envoi immédiat)

Mais...

```
int main(int argc, char *argv[]){
    int msg = 3;
    int my_rank;
    MPI_Status status;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &my_rank);
    if (my_rank == 0) { /* Hi! I'm process 0! */
        MPI_Send(&msg, 1, MPI_INT, 1, 98, MPI_COMM_WORLD);
        msg = 5;
        MPI_Send(&msg, 1, MPI_INT, 1, 98, MPI_COMM_WORLD);
    } else {
        MPI_Recv(&msg, 1, MPI_INT, 0, 98, MPI_COMM_WORLD, &status);
        MPI_Recv(&msg, 1, MPI_INT, 0, 98, MPI_COMM_WORLD, &status);
        printf("La valeur de msg est : %d \n", msg);
    }
    MPI_Finalize();
}
```

La valeur affichée est toujours 5

Communications collectives

Principes

- Routines de haut niveau permettant de gérer simultanément plusieurs communications.
- Doivent être appelées par tous les processus du communicateur

Exemples

- Barrière de synchronisation : tout le monde attend à un point de RDV
 - ▶ `int MPI_Barrier(MPI_Comm comm)`
 - Bloque les processus de `comm` jusqu'à ce qu'ils aient tous exécuté la primitive
- Broadcast : envoi d'un message à tout le monde;
- Répartition/collection de données
- Réduction (`MPI_Reduce`) : combinaison des données de plusieurs processus pour obtenir un résultat (somme, max, min...)
- Autres : `MPI_Alltoall...`

La diffusion d'une donnée

```
int MPI_Bcast(void* buf,  
             int count,  
             MPI_Datatype dtype,  
             int root,  
             MPI_Comm comm)
```

- root émet le contenu de sa variable `buf`
- Tous les processus de `comm` reçoivent le contenu de `buf`.

Exemple de broadcast

```
#include <mpi.h>

main(int argc, char **argv) {
    char msg[20];
    int my_rank;
    MPI_Status status;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &my_rank);
    if (my_rank == 0) { /*-- process 0 --*/
        strcpy(msg, "Hello world !");
    }

    MPI_Bcast(msg, strlen(msg)+1, MPI_CHAR, 0, MPI_COMM_WORLD);
    printf("Je suis %d et je recois : %s\n", my_rank, msg);
    MPI_Finalize();
}
```

Répartition de données

```
int MPI_Scatter(  
    void* sbuf, int scount, MPI_Datatype sdtype,  
    void* rbuf, int rcount, MPI_Datatype rdtype,  
    int root,  
    MPI_Comm comm)
```

- root envoie au processus i `scount` données à partir de l'adresse :

`sbuf + i * scount * sizeof(sdtype)`

- Les données sont stockées par chaque récepteur à l'adresse `rbuf`.

Exemple de Scatter à 5 processus

```
#include <mpi.h>
main(int argc, char **argv) {
    char msg[10];
    char recu;
    int my_rank;
    MPI_Status status;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &my_rank);
    if (my_rank == 2) { /*-- process 2 --*/
        strcpy(msg, "abcde");
    }

    MPI_Scatter(msg, 1, MPI_CHAR, &recu, 1, MPI_CHAR,
               2, MPI_COMM_WORLD);
    printf("Je suis %d et je recois : %c\n", my_rank, recu);
    MPI_Finalize();
}
```

Collection de données

```
int MPI_Gather(  
    void* sbuf, int scount, MPI_Datatype sdtype,  
    void* rbuf, int rcount, MPI_Datatype rdtype,  
    int root,  
    MPI_Comm comm)
```

- Chaque processus (y compris root) envoie à root `scount` données à partir de l'adresse `sbuf`
- root stocke les données reçues par `i` à l'adresse :
$$\text{rbuf} + i * \text{rcount} * \text{sizeof}(\text{rdtype})$$
- Et aussi : `MPI_Scatterv()`, `MPI_Gatherv()` ...

Exemple de Gather à 5 processus

```
main(int argc, char **argv) {
    char msg[10];
    char envoi = 97;      /* = 61h : code ascii de a */
    int my_rank;
    MPI_Status status;

    MPI_Init(&argc, &argv);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &my_rank);
    envoi += (char) my_rank;
    MPI_Gather(&envoi, 1, MPI_CHAR, msg, 1, MPI_CHAR,
             3, MPI_COMM_WORLD);
    if (my_rank == 3) {   /* je suis root */
        msg[5] = '\\0';   /* fin de chaine */
        printf("contenu de msg : %s\\n", msg);
    }
    MPI_Finalize();
}
```

contenu de msg : abcde

MPI-2 et MPI-3

- MPI-2 :
 - ▶ création et gestion dynamique des processus
 - ▶ mécanisme de communications unilatérales (*one-sided communications*)
 - ▶ entrées-sorties parallèles
 - ▶ précision du fonctionnement des appels MPI en mode *multi-thread* (depuis MPI 1.2) : voir cours suivants
- MPI-3 :
 - ▶ communications collectives non bloquantes
 - ▶ extension des *one-sided communications*
 - ▶ Fortran 2008
 - ▶ ...