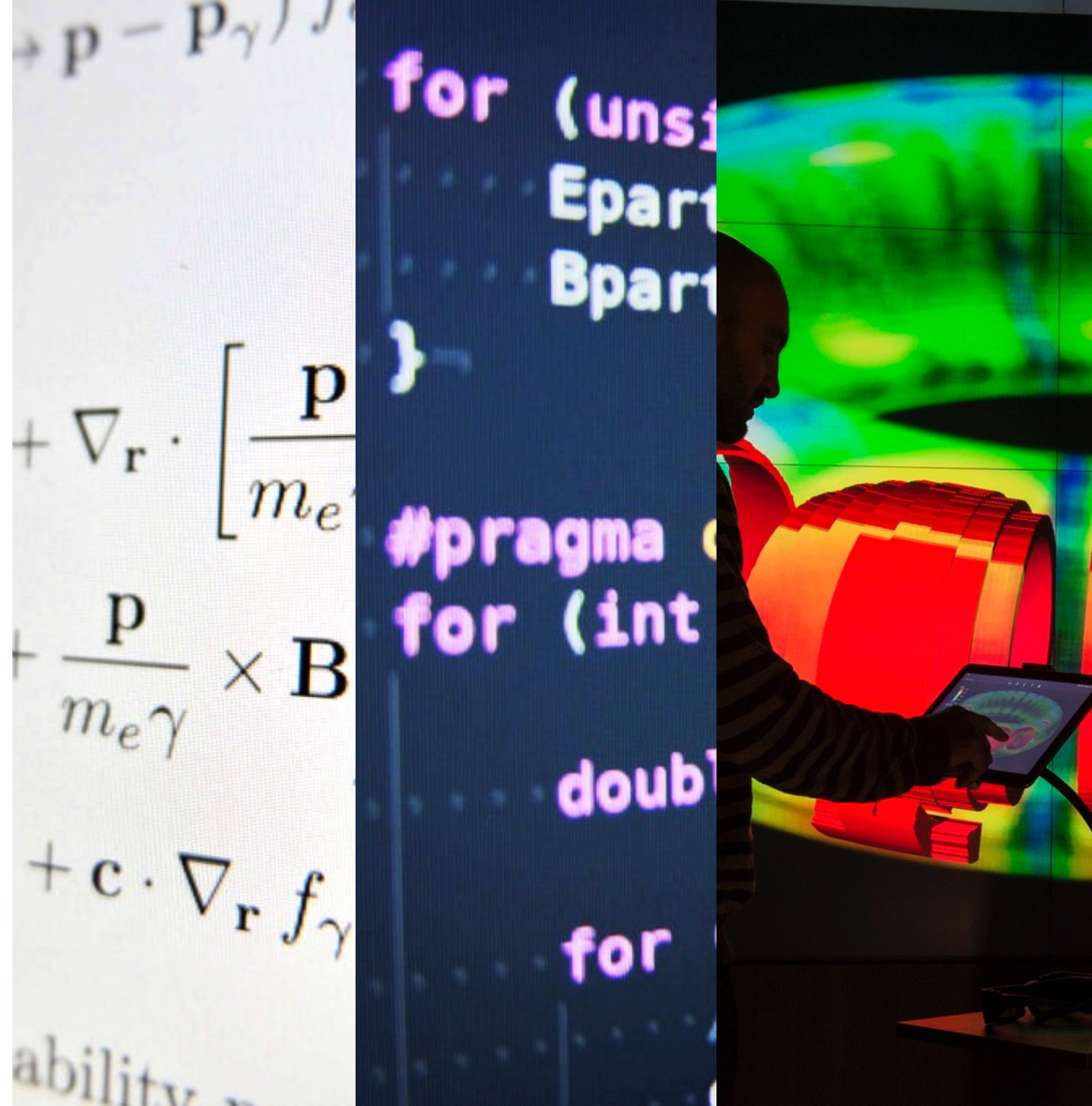


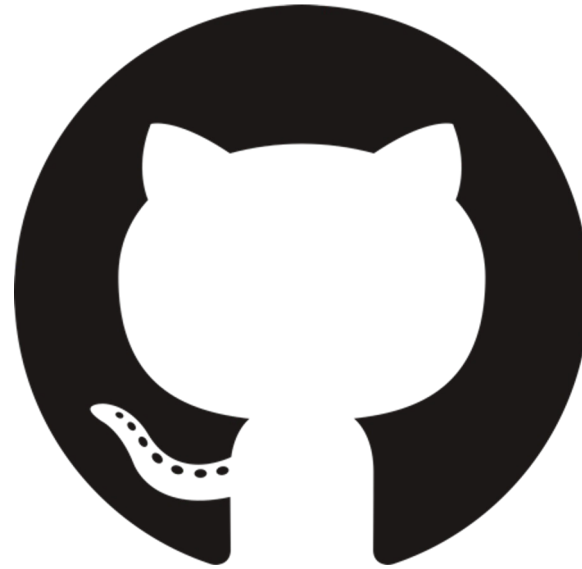
Introduction au parallélisme par échange de messages via MPI

Mathieu LOBET
Maison de la Simulation, CEA Saclay

Mathieu.lobet@cea.fr

Année 2023-2024





<https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay>

- I. Introduction au calcul parallèle
- II. Prise en main d'un super-calculateur
- III. Introduction au parallélisme par échange de message via MPI
- IV. Mesure de la performance
- V. Travaux pratiques

The background of the slide is a dark blue gradient. Overlaid on this are several abstract, glowing shapes. A large, elongated yellow shape is positioned in the lower-left quadrant. A smaller, bright red oval is located in the center-right area. Faint, wispy blue lines and larger, dimmer blue shapes are scattered across the background, creating a sense of depth and movement.

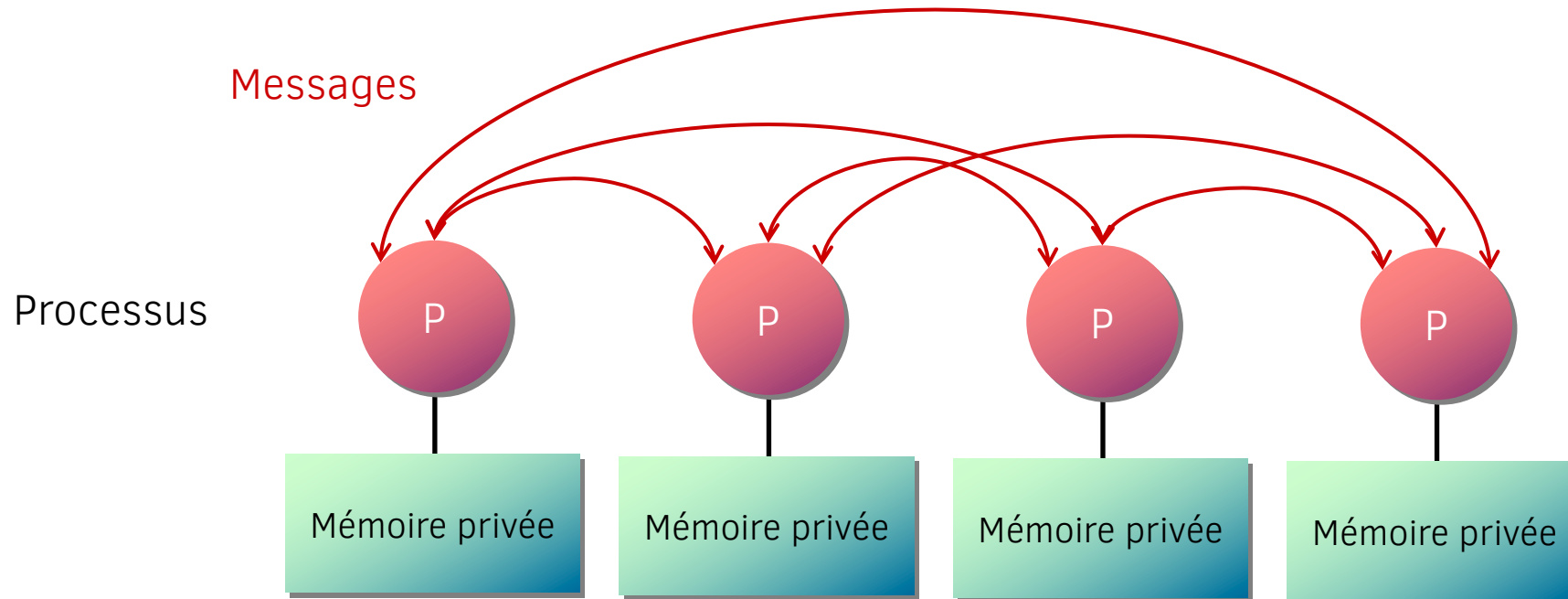
III. Introduction au parallélisme par échange de messages via MPI

1. Description de l'approche

- Les codes de simulation sont rarement basés sur une approche Python + MPI, ce sont le plus souvent des codes en C, C++ ou Fortran
- Pour faciliter l'apprentissage, ce cours vous présente MPI au travers de Python. L'API Fortran ou C est un peu plus complexe à utiliser mais les bases sont les mêmes
- Selon moi, le cours le plus complet sur MPI en français et anglais: <http://www.idris.fr/formations/mpi/>
- Les implémentations fournissent en général une documentation en ligne complète :
 - <https://www.open-mpi.org/>
 - <https://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpi/learning.html>
 - <http://mpi.deino.net/>
- MPI pour Python :
 - <https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/tutorial.html>

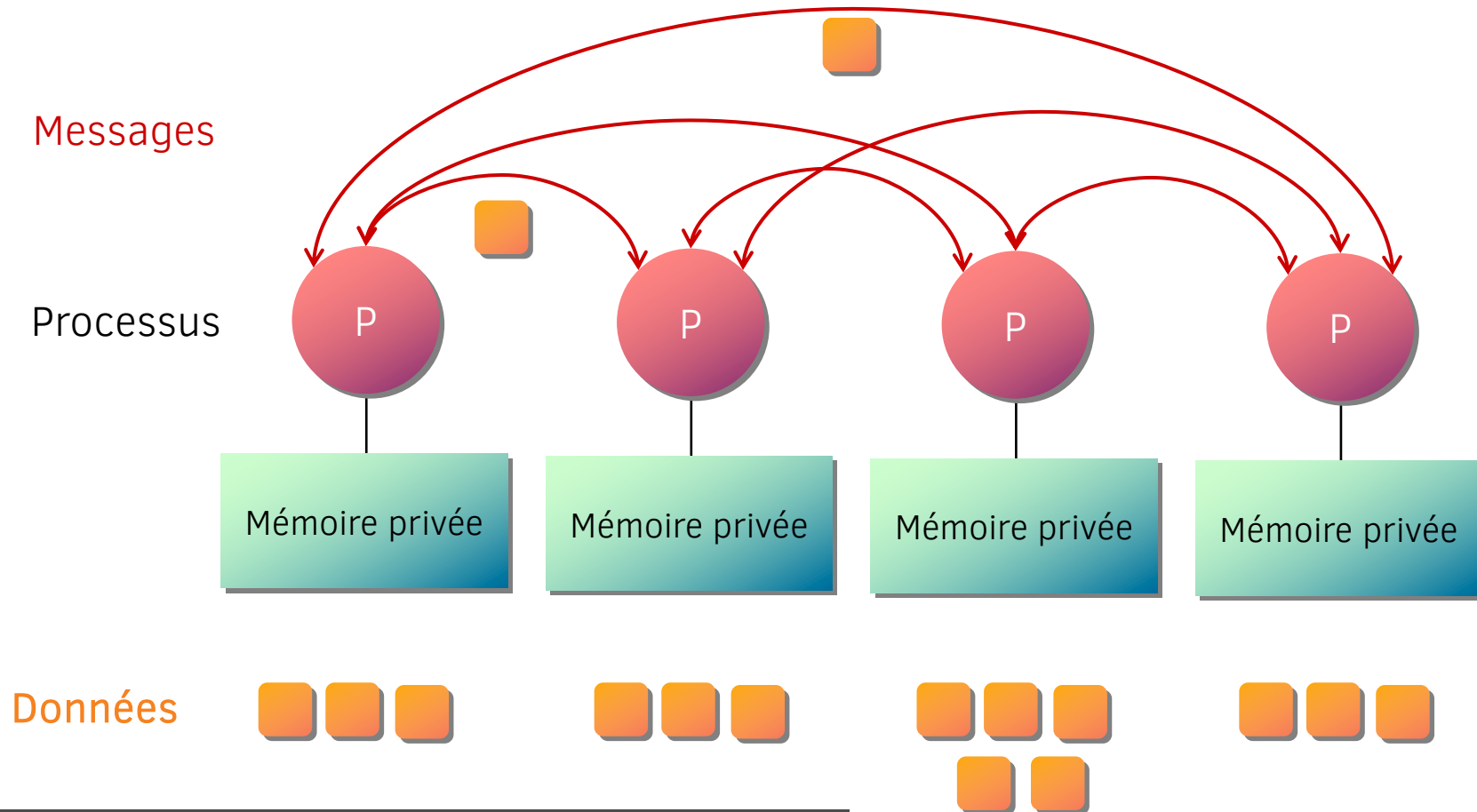
Paradigme par passage de messages : définition

Dans un modèle par **échange de messages**, les **différents exécutants** (*process*) ont leurs **données propres** qu'ils **communiquent** entre eux par **messages**. Ces messages peuvent servir à **échanger** une ou plusieurs données, ou se **synchroniser**.

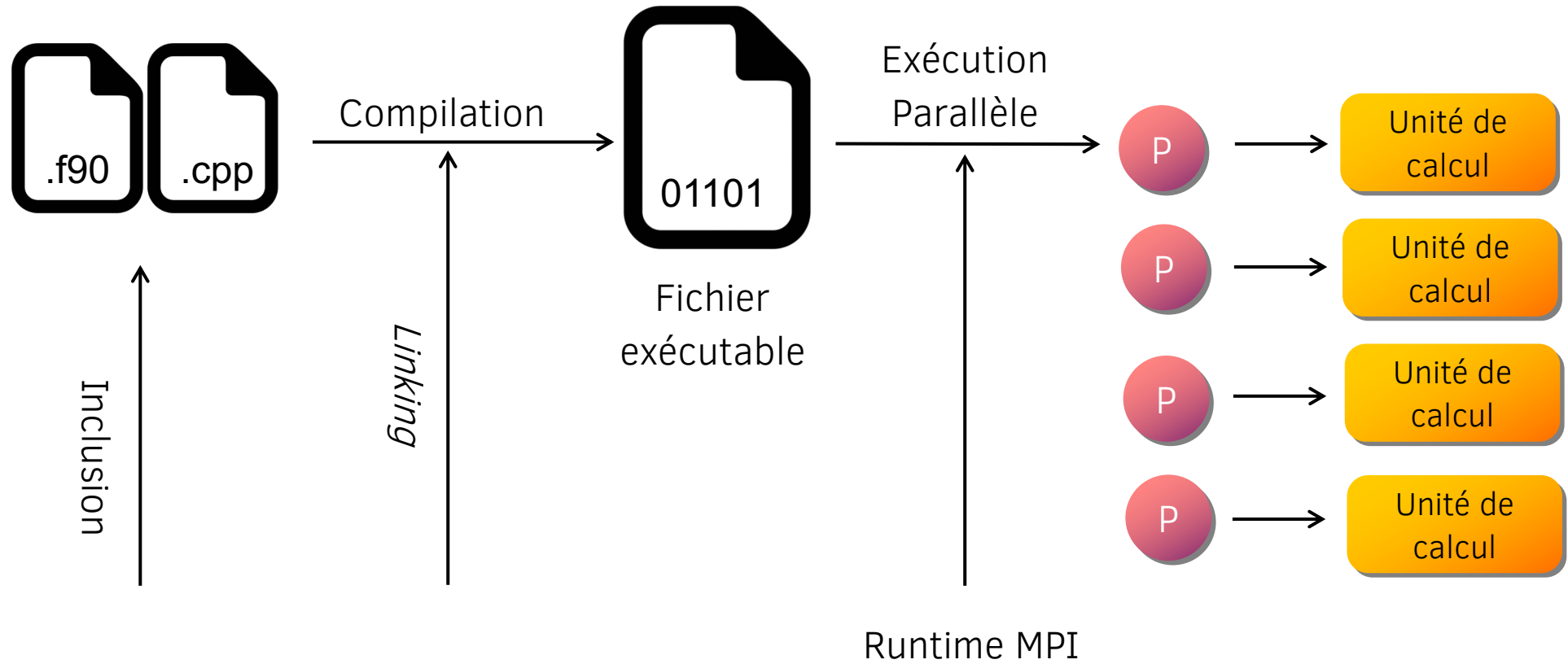


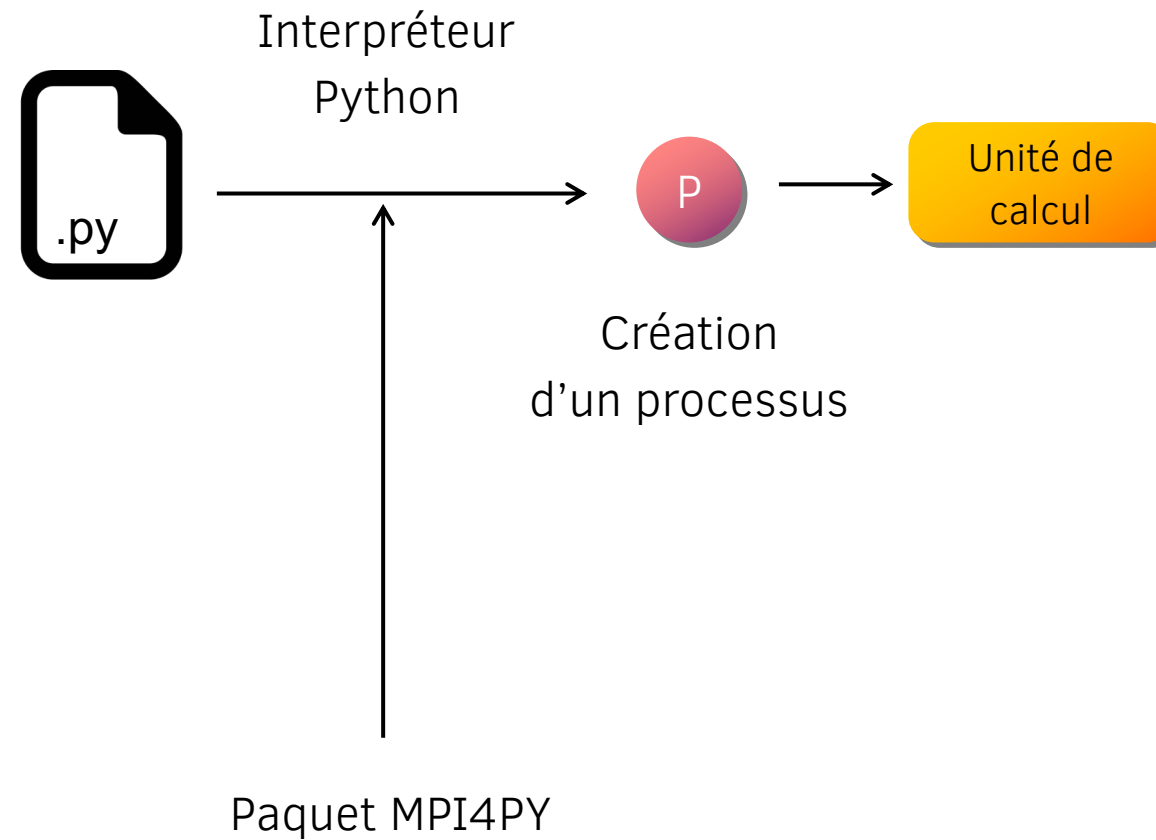
Paradigme par passage de messages : définition

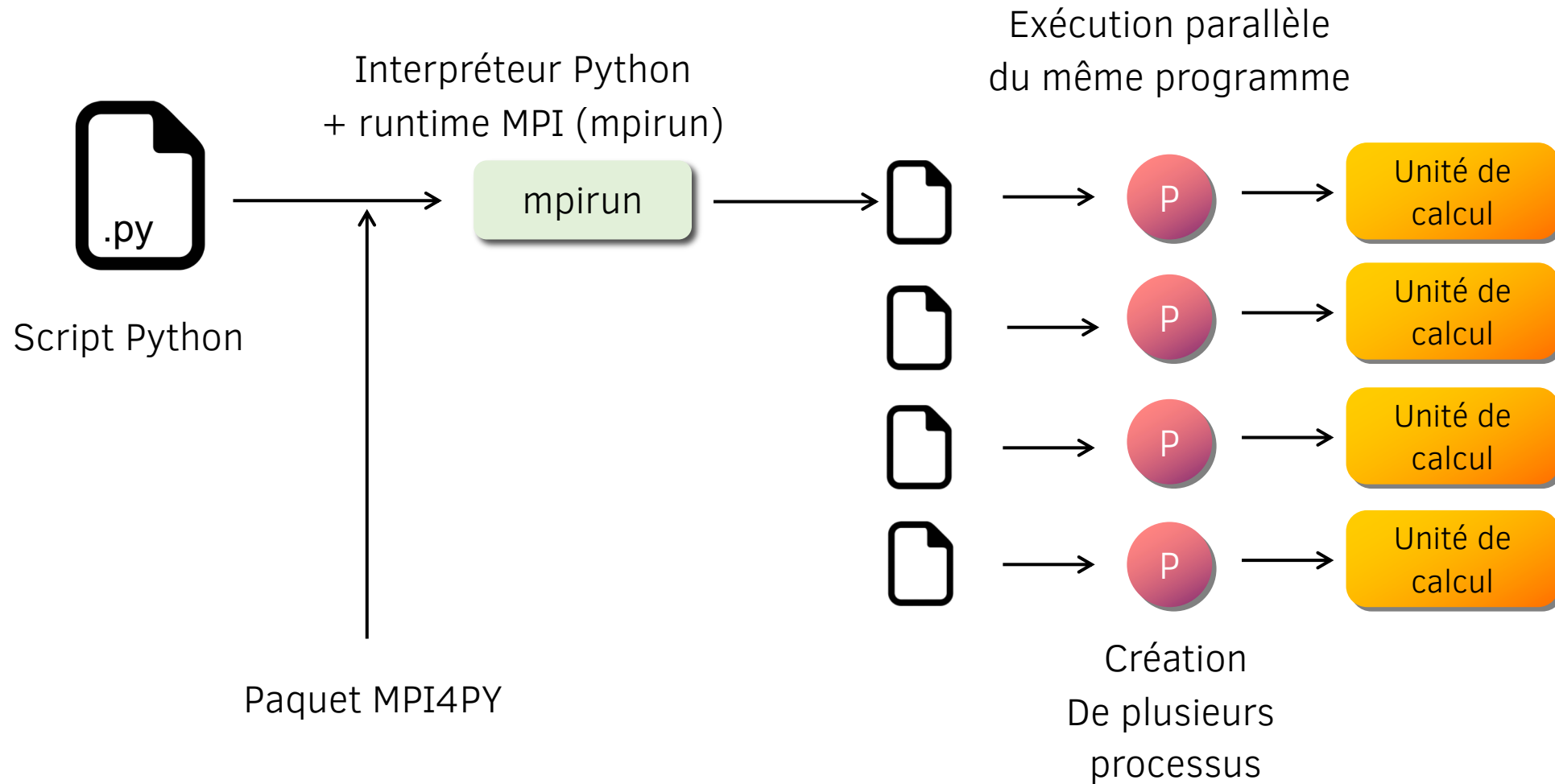
Dans un modèle par échange de messages, les différents exécutants (*process*) ont leurs données propres qu'ils communiquent entre eux par messages. Ces messages peuvent servir à échanger une ou plusieurs données, ou se synchroniser.



Programme parallèle avec appel aux fonctions MPI







- Contrairement à des langages compilés comme Fortran ou C, Python ne nécessite pas de compilation
- Pour l'exécution, on utilise la commande `mpirun` avant l'appel à `python`:
 - `-np` représente le **nombre de processus MPI à lancer**.
 - Si le nombre de processus MPI est inférieur au nombre d'unités de calcul disponibles, chaque processus est exécuté par une unité indépendante
 - Il est possible de lancer plus de processus MPI que d'unités de calcul, dans ce cas, les ressources sont partagées.
 - En OpenMPI, il faut spécifier « `--oversubscribe` » pour activer cette possibilité

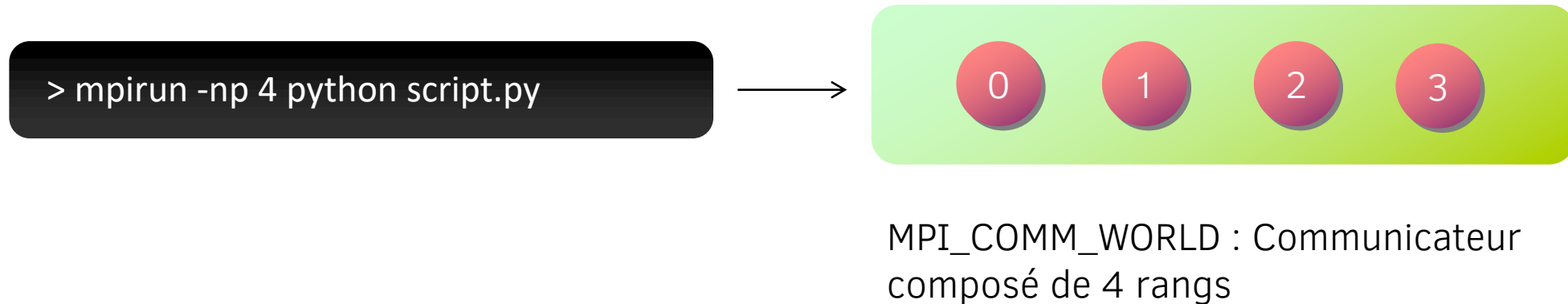
Pour exécuter votre code en ligne de commande avec N processus :



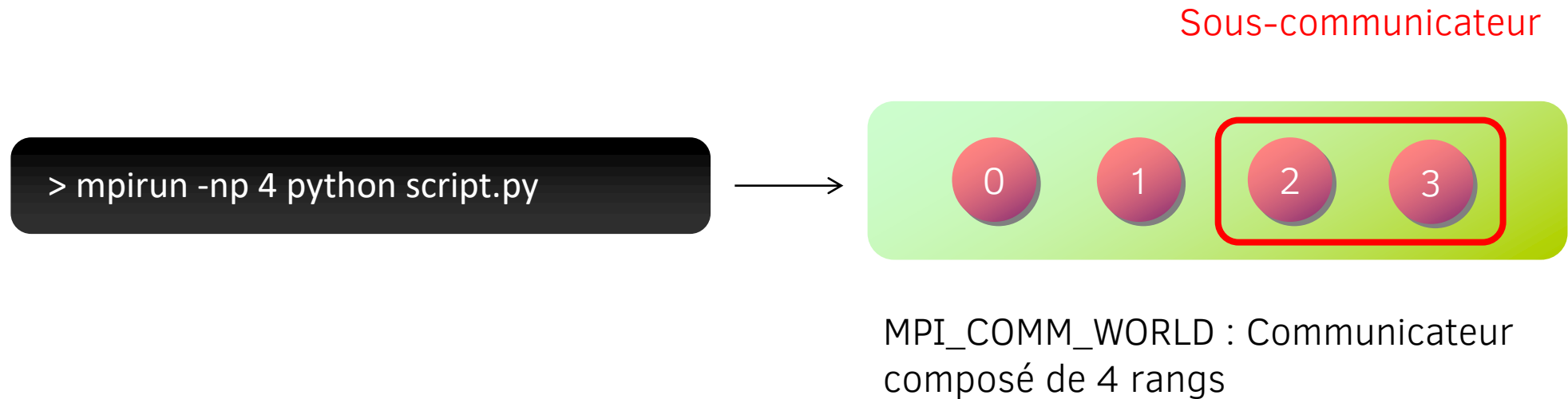
```
> mpirun -np N python mon_script_python.py
```

Démarrage d'un programme MPI : notion de communicateur

- Un **communicateur** est un ensemble de processus MPI capables de communiquer entre eux.
- Au sein d'un communicateur, chaque processus MPI est représenté par **un rang (*rank*) unique sous forme d'un entier**, c'est en quelque sorte son adresse.
- Le communicateur par défaut regroupe l'**ensemble des processus** et se nomme **MPI_COMM_WORLD**.
- C'est en quelque sorte l'annuaire de tous les processus en jeu



- Nous verrons qu'il est aussi possible de créer des sous-communicateurs



- Il est nécessaire comme pour chaque bibliothèque d'importer le paquet `mpi4py` avant son utilisation

script.py



```
# Exemple de script Python
```

```
import mpi4py  
from mpi4py import MPI
```

```
import numpy
```

```
...
```

Démarrage d'un programme MPI : initialiser MPI

- MPI est une bibliothèque qui fonctionne par appel à des fonctions fournies par une API
- Pour commencer à utiliser MPI, il faut d'abord appeler la fonction d'initialisation de MPI
- En Python l'étape d'initialisation peut être implicite mais nous la rendons explicite dans ce cours

script.py



```
# Exemple de script Python

import mpi4py

# On rend l'init explicite
mpi4py.rc.initialize = False
mpi4py.rc.finalize = False

from mpi4py import MPI

# On initialise MPI
MPI.Init()

...
```

- On doit à la fin du programme **finaliser MPI proprement**
- C'est surtout très important en C, C++ et Fortran

script.py



```
# Exemple de script Python

import mpi4py

# On rend l'init explicite
mpi4py.rc.initialize = False
mpi4py.rc.finalize = False

from mpi4py import MPI

# On initialise MPI
MPI.Init()

...

# On finalise MPI
MPI.Finalize()
```


- Le communicateur global est MPI_COMM_WORLD, on peut le récupérer via `MPI.COMM_WORLD` en Python

script.py



```
# Exemple de script Python

import mpi4py

# On rend l'init explicite
mpi4py.rc.initialize = False
mpi4py.rc.finalize = False

from mpi4py import MPI

# On initialise MPI
MPI.Init()

# On récupère le communicateur global
comm = MPI.COMM_WORLD

...
```

Démarrage d'un programme MPI : récupération du nombre de rangs

- Le **nombre de rangs** dans un communicateur se récupère via la fonction **MPI_COMM_SIZE**
- Pour MPI_COMM_WORLD c'est le **nombre total de processus** demandé à l'exécution.

script.py



```
# Exemple de script Python

...

# On récupère le communicateur global
comm = MPI.COMM_WORLD

# On récupère le nombre de processus
number_of_ranks = comm.Get_size()

...
```

Démarrage d'un programme MPI : récupérer le rang de chaque processus MPI

- Pour rappel, le rang est un identifiant unique permettant de désigner chaque processus.
- Chaque processus récupère son **rang** dans le communicateur `MPI_COMM_WORLD` via la fonction **`MPI_COMM_RANK`**.

script.py



```
# Exemple de script Python
```

```
...
```

```
# On récupère le communicateur global  
comm = MPI.COMM_WORLD
```

```
# On récupère le nombre de processus  
number_of_ranks = comm.Get_size()
```

```
# Chaque process récupère son numéro de rang dans le communicateur par défaut  
rank = comm.Get_rank()
```

```
...
```

Exercice 1 : votre premier programme MPI

- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/1_initialization
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/1_initialization.md
```

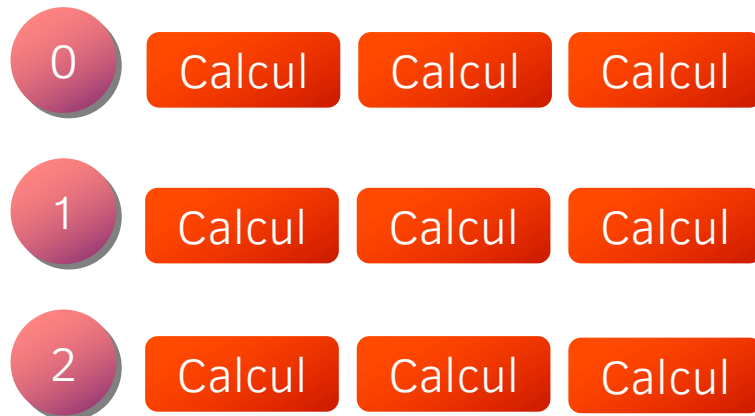
- Cet exercice a pour but de vous apprendre à concevoir vos premiers programmes MPI et de le lancer

- On parle de parallélisme lorsque chaque processus travaille sur ses tâches en même temps que les autres
- La base du parallélisme consiste donc à découper une charge de travail en sous-tâches pour les distribuer sur l'ensemble des travailleurs

Vision
séquentielle

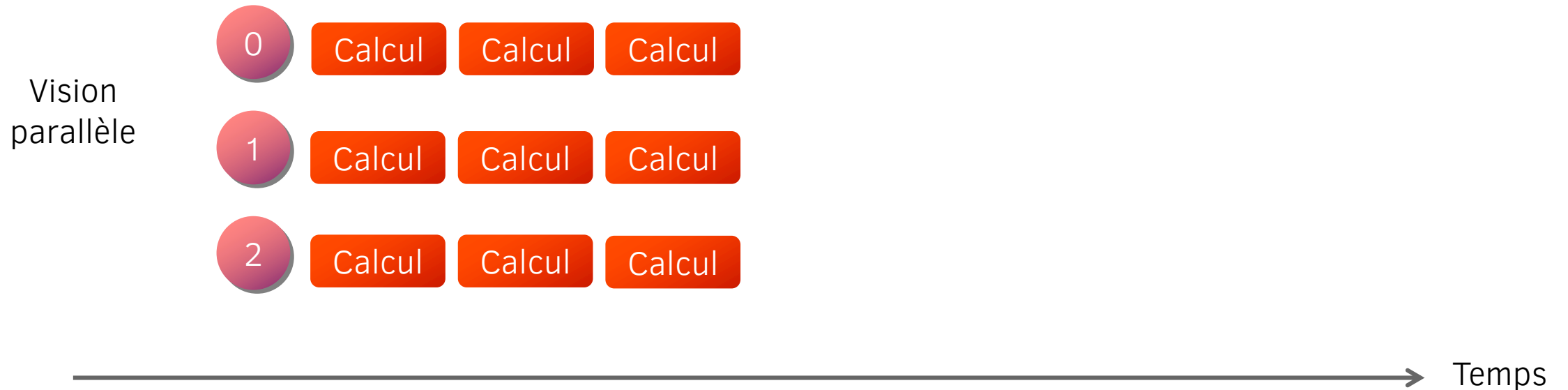


Vision
parallèle

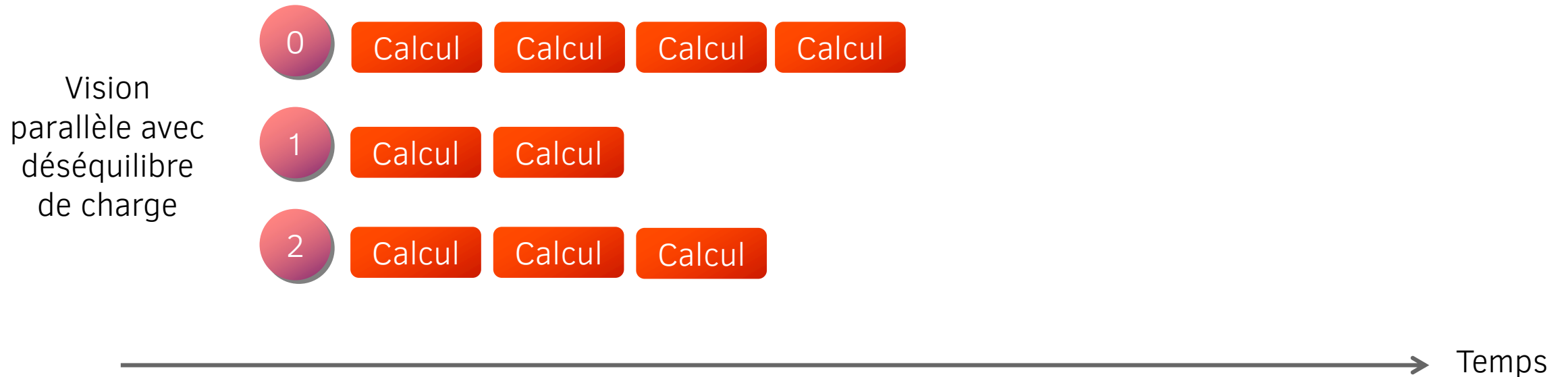


→ Temps

- Le parallélisme est ici **parfait** : tous les travailleurs ont la **même charge de travail**



- Dans le cas contraire, on parle de déséquilibre de charge



- **MPI.Wtime** permet de récupérer le temps écoulé sur le processus courant en secondes

script.py



```
# Exemple de script Python
```

```
...
```

```
# On récupère un nombre de secondes depuis l'init MPI
```

```
Time = MPI.Wtime()
```

```
...
```


- Par deux appels et une soustraction, cette fonction permet de déterminer le **temps passer dans une section du code**
- La mesure du temps permet d'estimer le déséquilibre de charge

script.py



```
# Exemple de script Python
```

```
...
```

```
# On récupère un nombre de secondes depuis l'init MPI
```

```
Time_start = MPI.Wtime()
```

```
# Phase de calcul
```

```
...
```

```
Time_stop = MPI.Wtime() - time_start;
```

- Le programme s'exécute simultanément autant de fois qu'il y a de processus en parallèle : chaque ligne de code est appelée par chaque processus.
- Pour faire en sorte que certaines portions de code soient réservées à certains processus, on utilise des conditions `if` avec le numéro de rang comme condition.

script.py



```
# Exemple de script Python

# Chaque process récupère son numéro de rang dans le communicateur par défaut
rank = comm.Get_rank()

if (rank == 1):
    # Faire des actions que sur le processus de rang 1
    ...
```

Exercice 2 : parallèle parfait

- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/2_embarrassingly_parallel
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/2_embarrassingly_parallel.md
```

- Cet exercice a pour but de vous familiariser avec la notion de parallélisme

A ce stade du cours, vous savez maintenant :

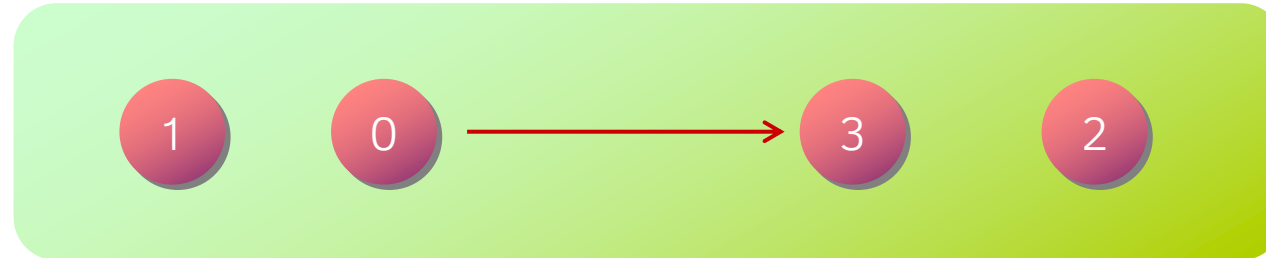
- Écrire un programme parallèle simple
- Exécuter un programme MPI
- Récupérer le nombre de rangs et le rang de chaque processus

The background of the slide is a dark blue gradient. Overlaid on this are several abstract, glowing shapes. A large, irregular blue shape is prominent in the center. To its left, there is a bright yellow, elongated, and somewhat blurry shape. To the right of the central blue shape, there is a smaller, solid red oval. The overall effect is a high-tech or scientific aesthetic.

III. Introduction au parallélisme par échange de messages via MPI

2. Les communications point à point bloquantes

- L'échange de message constitue la base du concept MPI
- L'échange de message se décompose toujours en **deux étapes** :
 - **Envoi** : Un processus envoie un message à un processus destinataire en spécifiant le rang
 - **Réception** : Un processus doit explicitement recevoir le message en connaissant le rang de l'expéditeur



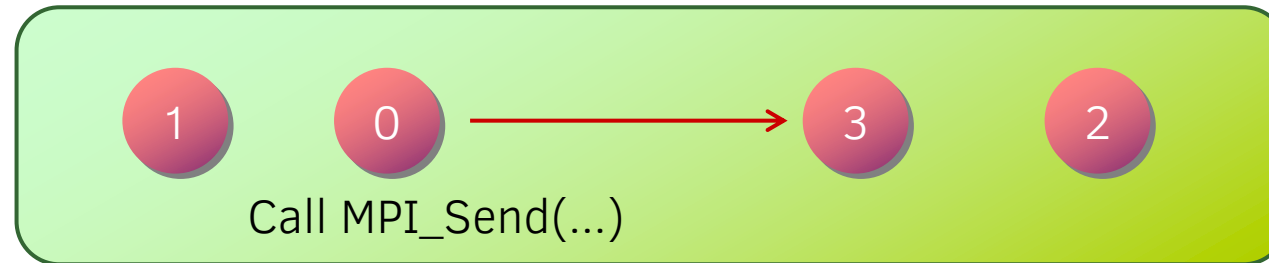
← Le processus de rang 0 envoie un message au processus de rang 3

→ Le processus de rang 3 reçoit un message du processus de rang 0

- `MPI_Send` est la fonction appelée par le processus expéditeur



```
# Exemple de script Python  
comm.send(message, destination, tag)
```



<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Comm.html?highlight=send#mpi4py.MPI.Comm.Send>

- `MPI_Send` est la fonction appelée par le processus expéditeur



```
# Exemple de script Python  
comm.send(message, destination, tag)
```

- Message : données que vous souhaitez envoyer à un autre processus
- Destination (`int`) : rang du processus destinataire
- Tag (`int`) : numéro attribué à la communication si plusieurs coms vers le même processus

<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Comm.html?highlight=send#mpi4py.MPI.Comm.Send>

- La notion de tag permet de différencier des communications mais cet aspect ne sera pas exploité dans ce cours.
- Une valeur de tag par défaut peu être donnée ou l'utilisation du paramètre `MPI_ANY_TAG` permet d'ignorer l'utilisation de ce dernier.

- Envoi d'un message de type double au processus de rang 3 par le processus de rang 2



```
message = 1234.56
tag = 0
destination = 3

if (rank == 2):
    comm.send(message, destination, tag)
```

- Envoi d'un message de type liste d'entiers au processus de rang 5 par le processus de rang 1



```
message = [12,45,67,34,54]
tag = 0
destination = 5

if (rank == 1):
    comm.send(message, destination, tag)
```

- Envoi d'un message de type dictionnaire au processus de rang 6 par le processus de rang 1



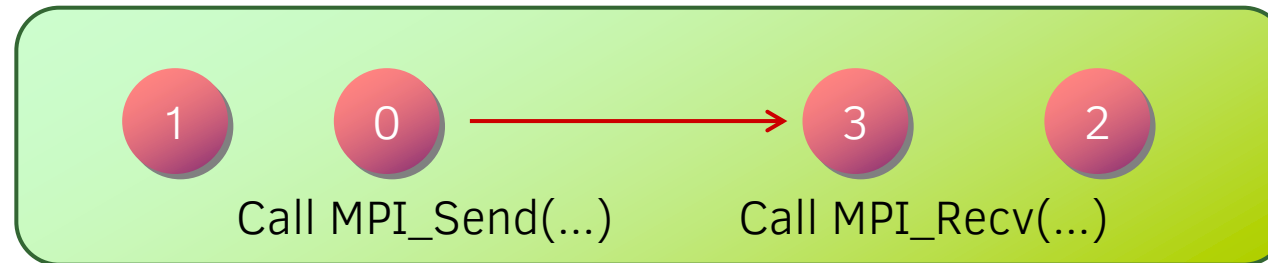
```
message = {'a':1, 'b':2}
tag = 0
destination = 6

if (rank == 1):
    comm.send(message, destination, tag)
```

• `MPI_Recv` est la fonction appelée par le processus destinataire



```
message = comm.recv(source, tag=tag)
```



<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Message.html?highlight=recv#mpi4py.MPI.Message.Recv>

• **MPI_Recv** est la fonction appelée par le processus destinataire



```
message = comm.recv(source, tag)
```

- **Message** : la variable contenant le message à recevoir
- **source** : rang du processus expéditeur
- **Tag (int)** : numéro attribué à la communication si plusieurs coms vers le même processus

<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Message.html?highlight=recv#mpi4py.MPI.Message.Recv>

- Envoi d'un message de type **double** au processus de rang 3 par le processus de rang 2
- Réception d'un message de type **double** par le rang 2 venant du rang 3

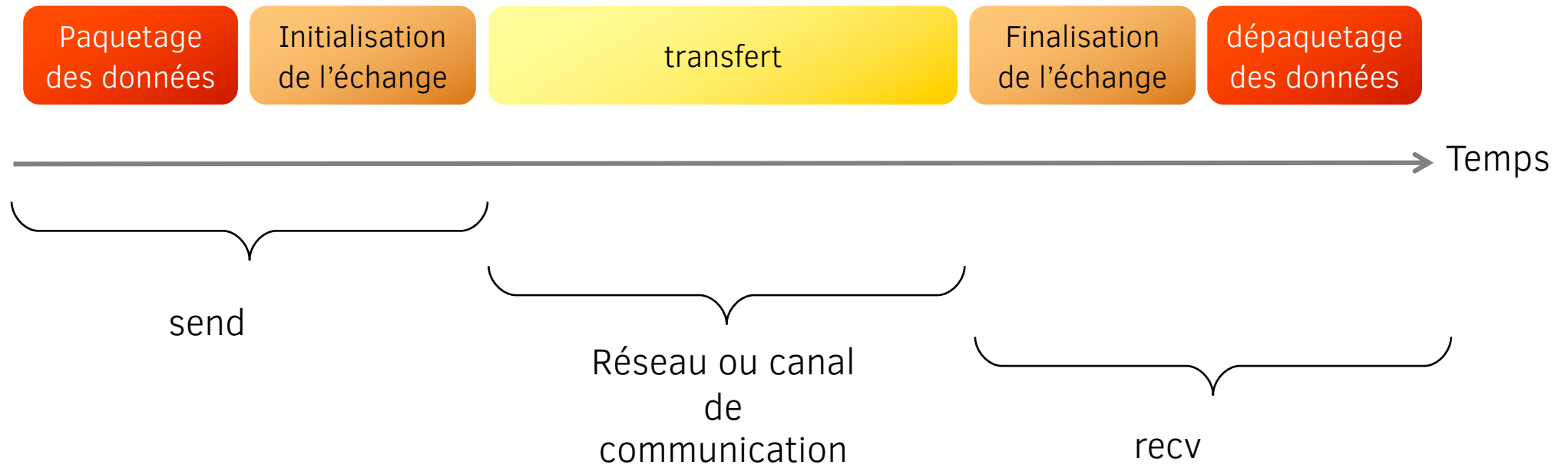


```
Tag = 0
destination = 3
source = 2

if (rank == 2):
    message = 1234.56
    comm.send(message, destination, tag)

if (rank == 3):
    message = comm.recv(source, tag)
```

- Une communication se compose d'un ensemble de sous-étapes :



Exercice 3 : communication bloquante

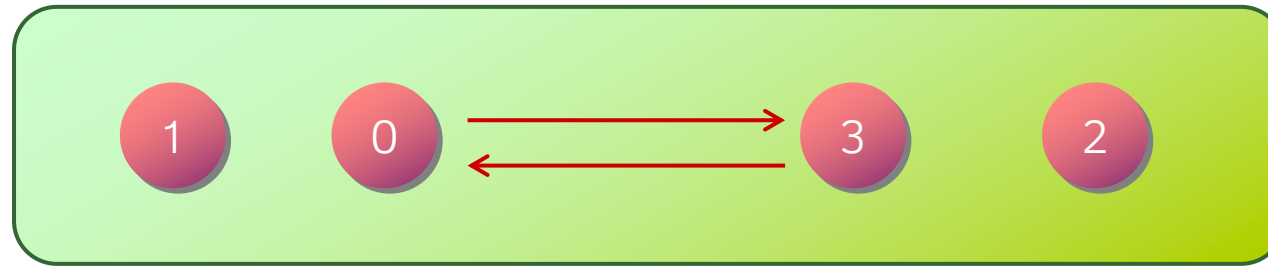
- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/3_blocking_com
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/3_blocking_com.md
```

- Cet exercice a pour but de tester les communications bloquantes

Il est parfois nécessaire de faire un **échange mutuel** de données. Pour ce faire, il existe une fonction qui **allie l'envoi et la réception** : **Sendrecv**.



Le processus de rang 0 envoie et reçoit un message au processus de rang 3
Le processus de rang 3 envoie et reçoit un message du processus de rang 0

- **Sendrecv** est appelée par les processus expéditeur et destinataire en même temps



```
recv_message = comm.sendrecv(send_message, destination, sendtag, source, recvtag,  
status)
```

- `send_message (const void *)` : données envoyées
- `recv_message (void *)` : données reçues
- Les autres paramètres sont les mêmes que pour **Send** et **Recv**

<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Comm.html?highlight=sendrecv#mpi4py.MPI.Comm.Sendrecv>

- Le rang 2 envoie un message au rang 3 et reçoit un message du rang 1

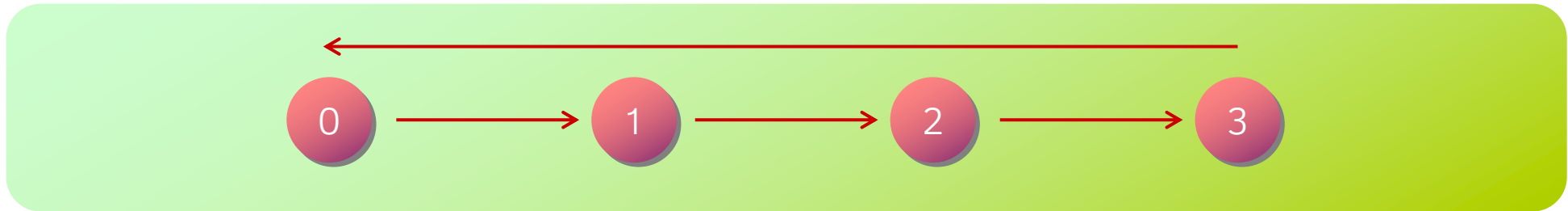


```
tag = 0
send_rank = 3
recv_rank = 1
send_message = 21.78

if rank == 2:
    recv_message = comm.sendrecv(send_message, send_rank, tag, recv_rank, tag, status = None)
```

Communication point à point : MPI_SENDRECV pour les communications chaînées

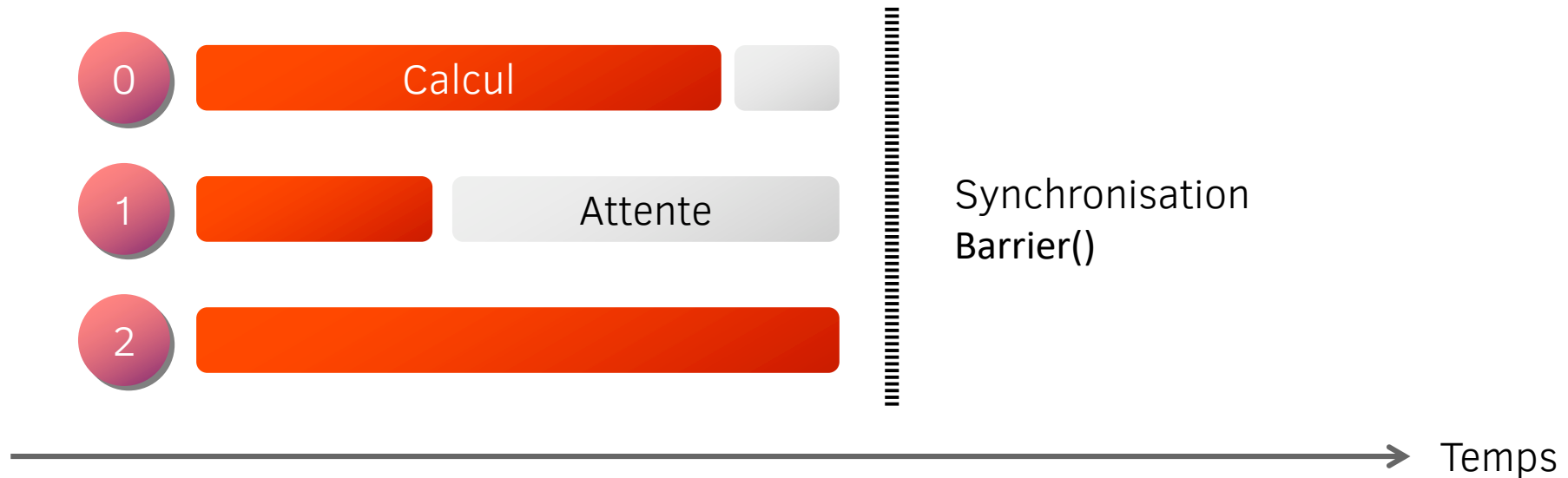
- La fonction `Sendrecv` est également nécessaire pour effectuer des **communications chaînées**
- L'utilisation de `Send` et `Recv` nécessiterait de gérer manuellement les synchronisations



- Chaque processus reçoit un élément d'un processus A et envoie des données à un processus B distinct.
- Lorsqu'une communication n'arrive pas à son terme, le programme attend et peut rester figé.

Notion de barrière explicite

- Il est parfois nécessaire d'imposer une **étape de synchronisation ou barrière** qui ne sera pas franchie tant que tous les processus ne seront pas arrivés à ce niveau
- La fonction **Barrier** est une **manière explicite d'exiger cette synchronisation** dans le code



Notion de barrière explicite

- Il est parfois nécessaire d'imposer une **étape de synchronisation ou barrière** qui ne sera pas franchie tant que tous les processus ne seront pas arrivés à ce niveau
- La fonction **MPI_Barrier** est une **manière explicite d'exiger cette synchronisation** dans le code

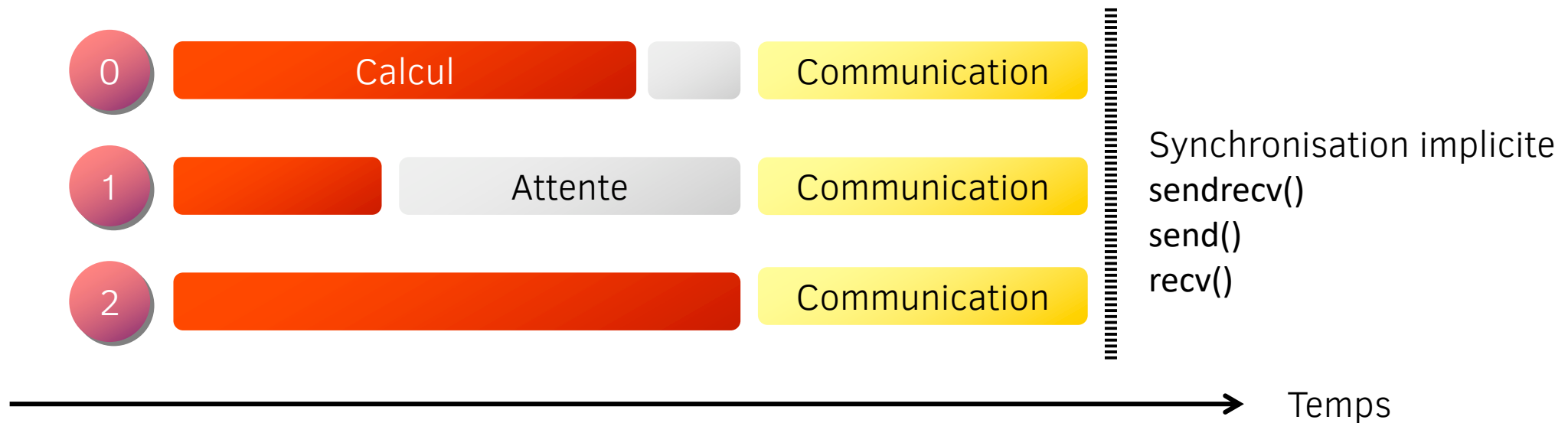


```
comm.Barrier()
```

<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Comm.html?highlight=Barrier#mpi4py.MPI.Comm.barrier>

Notion de barrière implicite

- Certaines fonctions d'échange induisent des barrières implicites au niveau des processus concernés
- C'est le cas de Send, Recv, Sendrecv d'où l'appellation de **communication bloquante**



- Si certains processus sont en avance, ils effectuent une attente active ou passive. Cette attente est vue comme une perte de ressource.

Exercice 4 : communication en anneau

- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/4_sendrecv
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/4_sendrecv.md
```

- Cet exercice a pour but de tester les communications sendrecv au travers d'un anneau de communication

A ce stade du cours, vous savez maintenant :

- Faire communiquer différents processus entre eux
- Gérer des chaînes de communication
- Demander une synchronisation explicite

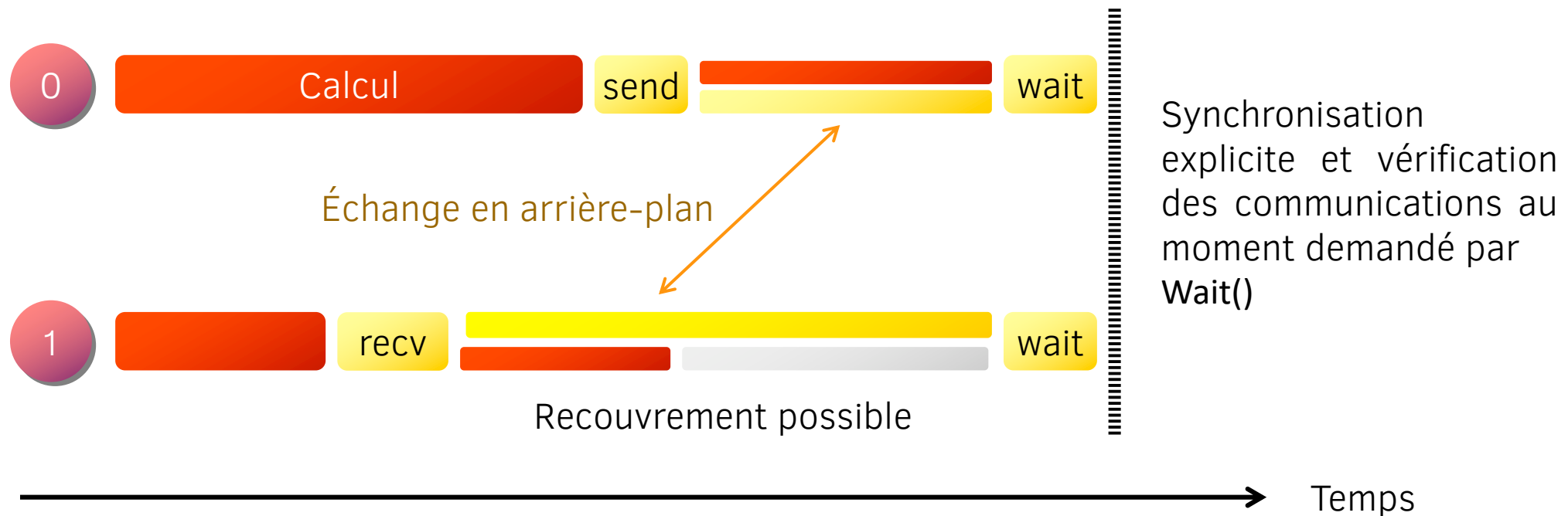
The background of the slide features an abstract, artistic composition. It consists of several overlapping, ethereal shapes in shades of blue, yellow, and red. A large, bright yellow, elongated shape is positioned in the lower-left quadrant. A smaller, red, oval shape is located in the center-right area. The overall effect is a soft, glowing, and somewhat nebulous visual that serves as a backdrop for the text.

III. Introduction au parallélisme par échanges de message via MPI

3. Les communications point à point non-bloquantes

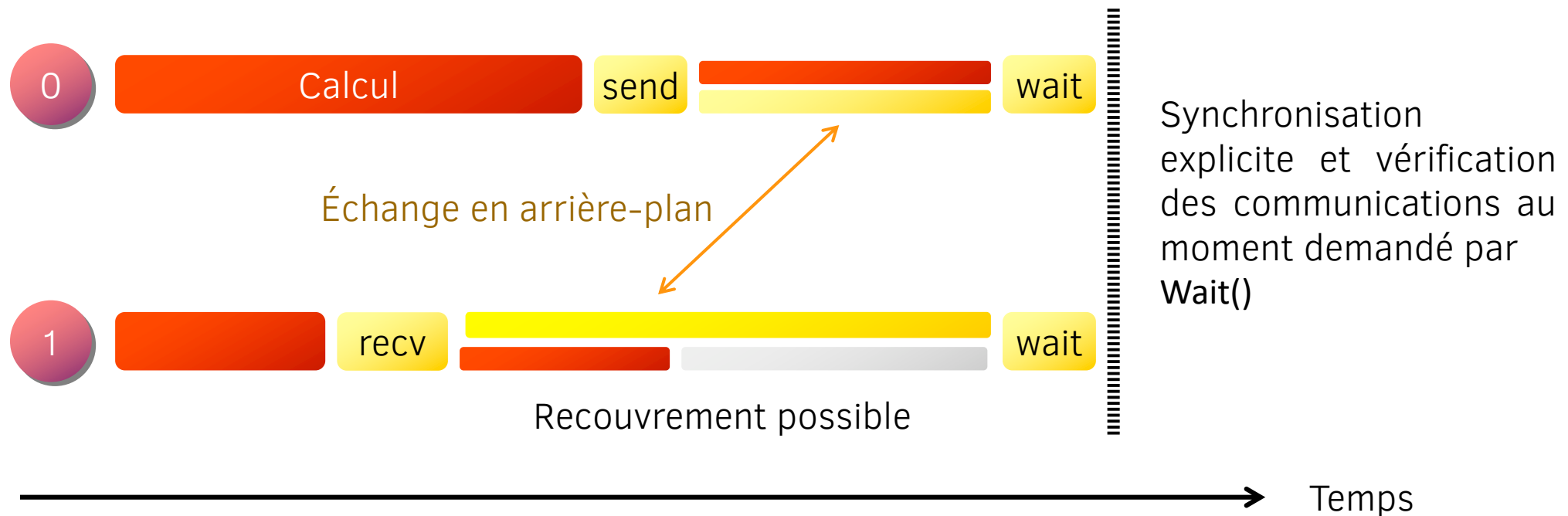
Communication point à point non-bloquante

- Les **communications non-bloquantes** permettent d'éviter la **synchronisation implicite** des processus.
- Une **synchronisation explicite** est nécessaire pour s'assurer que les communications ont eu lieu **avant d'utiliser les données échangées**
- Ce type de communication permet de **recouvrir communication et calcul** : envoi et réception en arrière-plan



Communication point à point non-bloquante

- Les communications se font via les fonctions **I**send et **I**recv.
- Les communications se voient attribuées **un identifiant unique**
- A un moment donné, il est nécessaire de **vérifier que ces communications ont eu lieu**, c'est le rôle de **Wait**. Cette fonction analyse les identifiants fournis.
- **Wait** impose une barrière



- **Isend** est la fonction appelée par le processus expéditeur



```
req = comm.isend(rank, dest, tag)
```

- **Irecv** est la fonction appelée par le processus receveur



```
req = comm.irecv(source, tag)
```

- Les paramètres sont les mêmes pour que pour les communications bloquantes.
- S'ajoute la variable **request** (de type **MPI_Request ***) utilisé par **MPI_Wait** pour vérifier l'état de la communication

<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Comm.html?highlight=isend#mpi4py.MPI.Comm.Isend>

<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Message.html?highlight=irecv#mpi4py.MPI.Message.Irecv>

Wait est la fonction appelée pour vérifier et attendre que la communication a bien été effectuée



```
comm.wait(req)
```

<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Request.html?highlight=wait#mpi4py.MPI.Request.wait>

Exemple d'utilisation des communications non-bloquantes

- Envoi d'un message de type double au processus de rang 3 par le processus de rang 2
- Réception d'un message de type double par le rang 3 venant du rang 2



```
Tag = 0
```

```
If rank == 2:  
    req_send = comm.isend(message, 3, tag=tag)
```

```
If rank == 3:  
    req_recv = comm.irecv(2, tag=tag)
```

```
req_send.wait()  
recv_message = req_recv.wait()
```


- **Waitall** effectue l'action de `MPI_Wait` sur un tableau de requêtes.



```
req2 = comm.Irecv(message, dest_rank)
req1 = comm.Isend(dest_message, src_rank)

MPI.Request.Waitall([req1, req2])
```

Il est tout à fait possible de mélanger des appels bloquants à des appels non-bloquants.

Lorsque la requête est terminée, elle devient `MPI_REQUEST_NULL`. Il est également possible d'initialiser certaines requêtes ainsi pour les ignorer lors du `Wait` et `Waitall`.

Exercice 5 : Communications non bloquantes

- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/5_nonblocking_com
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/5_nonblocking_com.md
```

- Cet exercice a pour but de tester les communications non bloquantes

Exercice 6 : Communications de tableaux

- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/6_array_com
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/6_array_com.md
```

- Cet exercice a pour but de tester les communications avec des tableaux

The background of the slide is a dark blue gradient. Overlaid on this are several abstract, glowing shapes. A large, elongated yellow shape is positioned in the lower-left quadrant. A smaller, bright red oval is located in the center-right area. Faint, larger blue shapes are also visible, creating a sense of depth and movement.

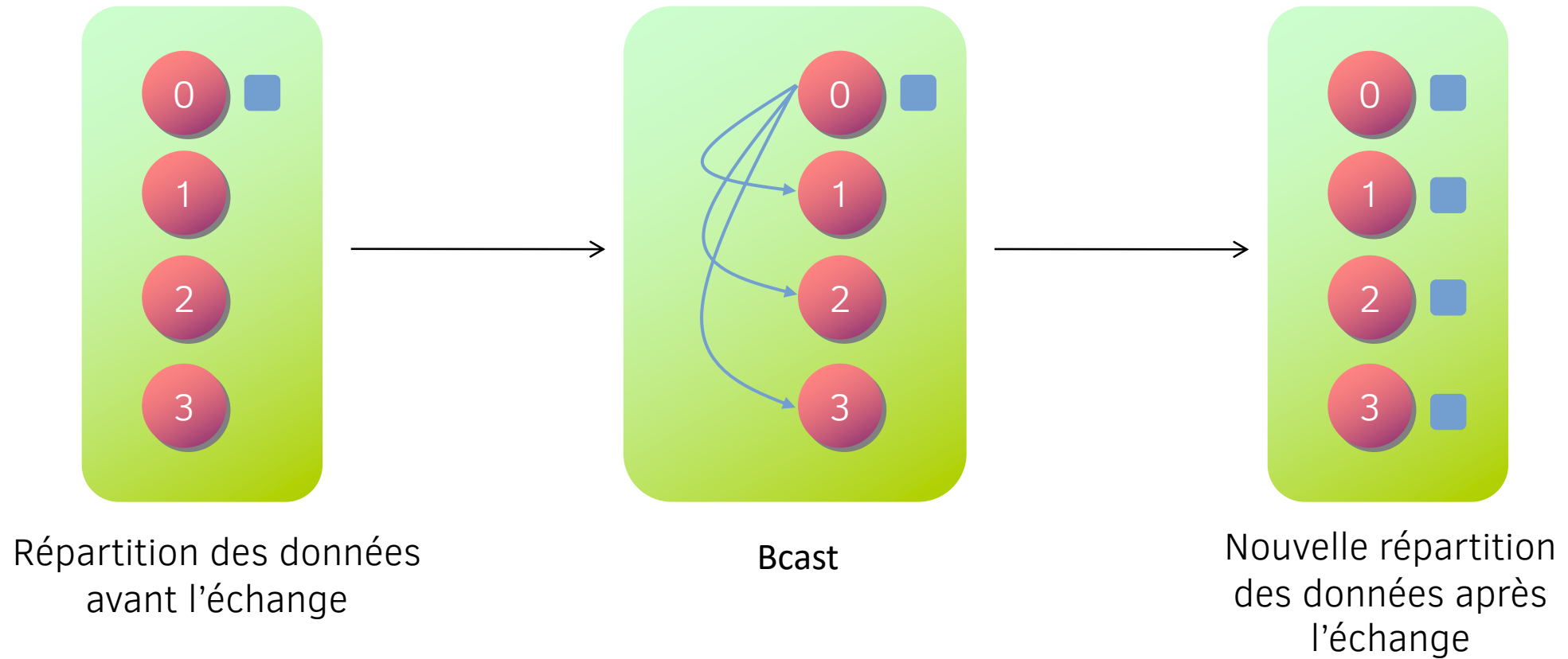
III. Introduction au parallélisme par échange de messages via MPI

4. Les communications collectives

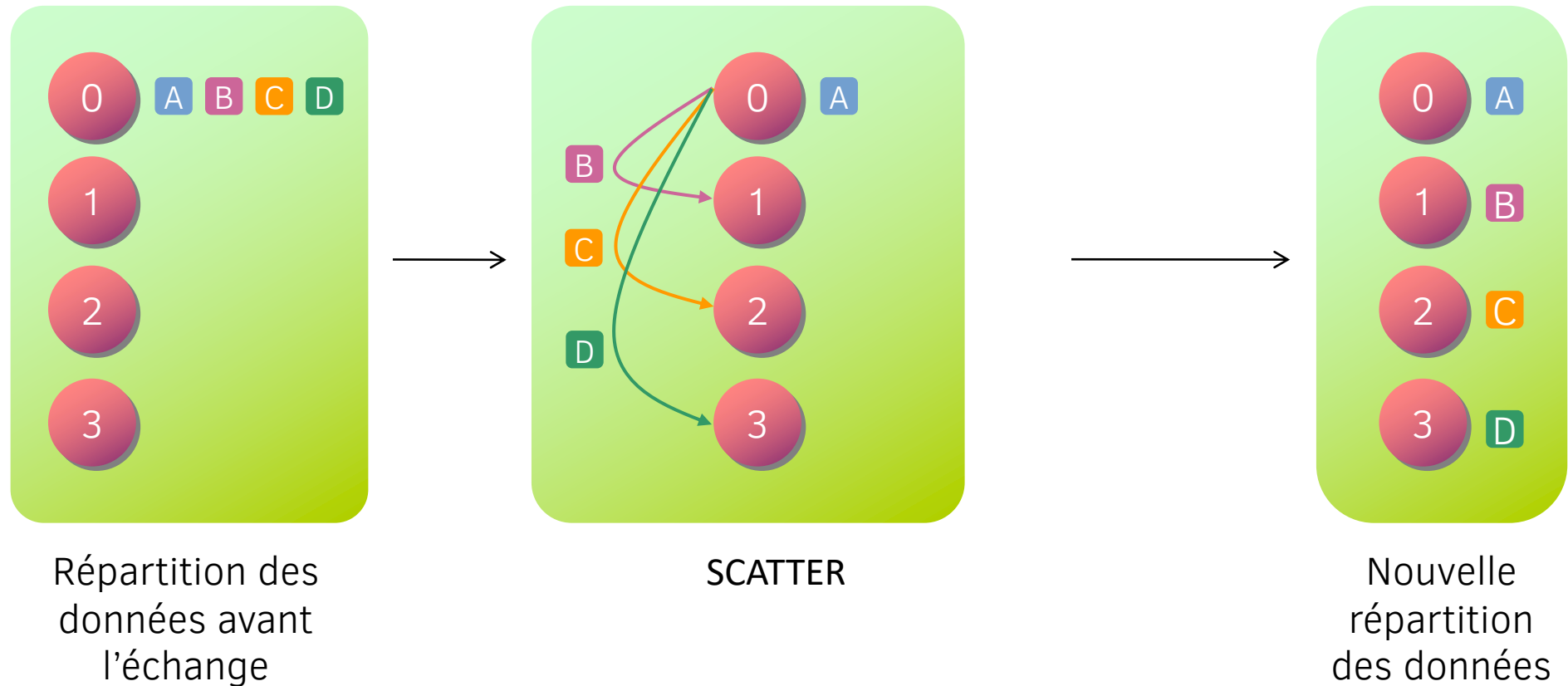
- Les **communications collectives** sont des communications qui font intervenir **plusieurs processus** (voir tout le communicateur) dans le but de propager ou de rassembler de l'information.
- 3 types de communication collective :
- **Synchronisation** : c'est le **Barrier**
- **Transfert de données** (diffusion, collecte)
- **Transfert et opérations sur les données** (opération de réduction)

Les versions standards induisent des barrières implicites pour les processus concernés. Pour chaque processus, la barrière est relâchée dès la participation terminée.

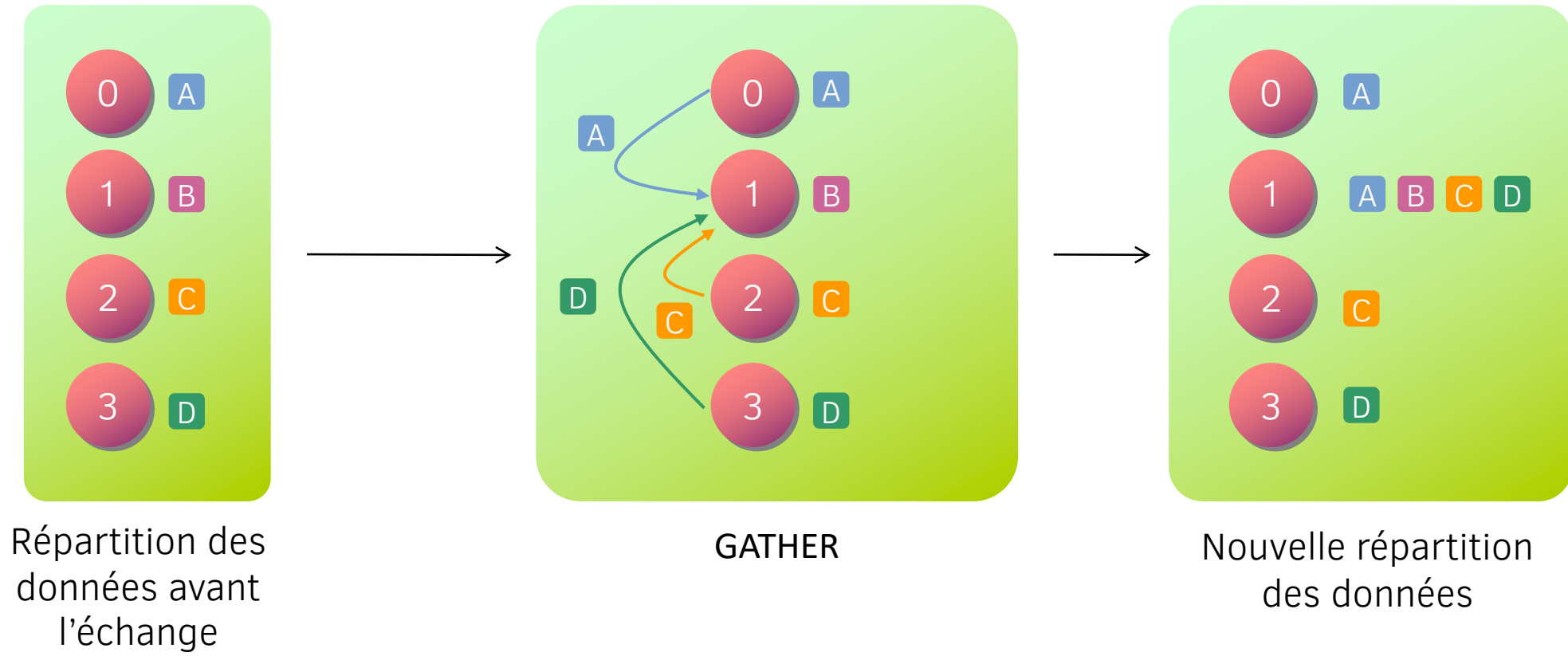
- Envoi d'une donnée depuis un processus vers tous les processus du communicateur



- Partage de données sélectif (selon les critères du développeur) depuis un processus vers tous les processus du communicateur



- Envoi de données réparties sur plusieurs processus vers un processus unique



- **Gather** est appelée par les processus expéditeurs et destinataires en même temps



```
comm.Gather(send_buffer, recv_buffer, root=0)
```

- **send_buffer** : la valeur ou un ensemble de valeurs à envoyer depuis chaque processus
- **recv_buffer** : le tableau réunissant les valeurs reçues
- **root** : le processus qui reçoit les données et reconstruit le tableau final

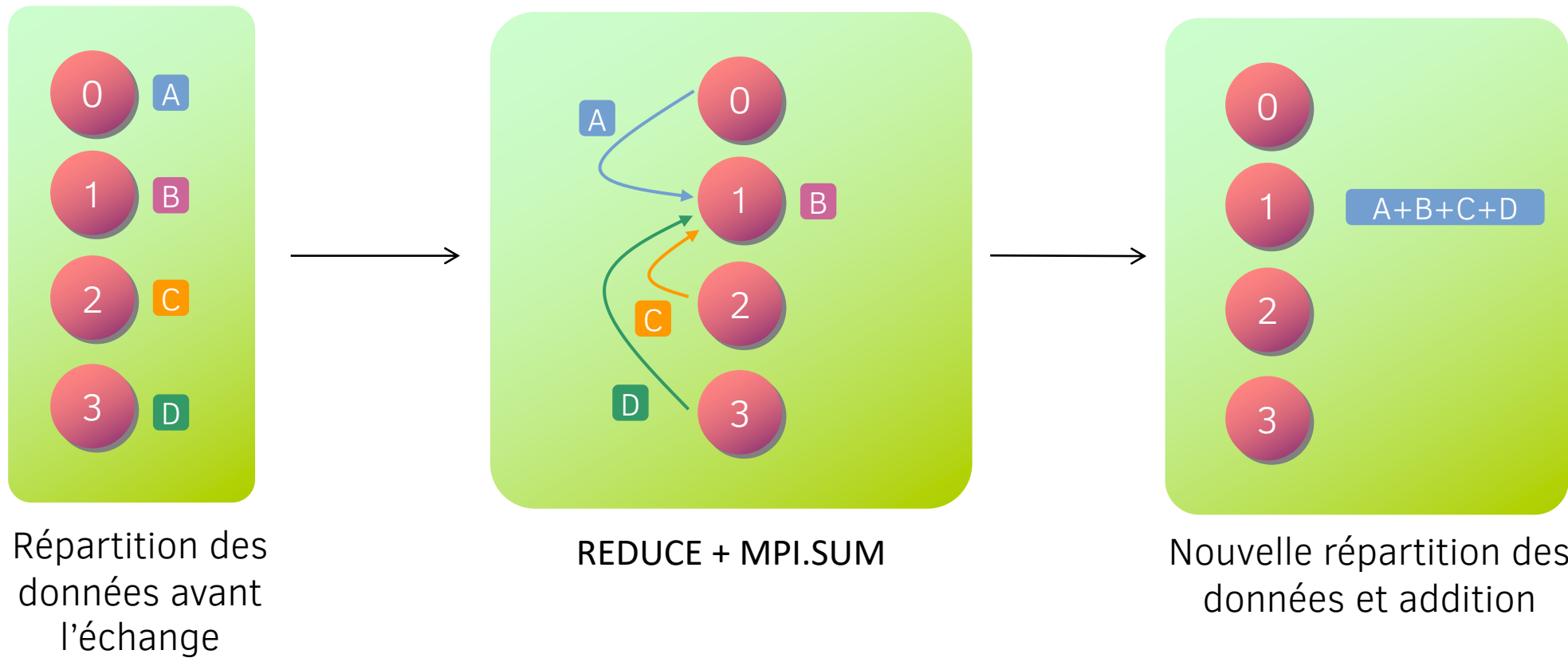
- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/7_gather_com
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/7_gather_com.md
```

- Cet exercice a pour but de tester les communications collectives de typer gather

- Envoi de données réparties sur plusieurs processus vers un seul processus avec une opération de réduction réalisée simultanément



<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Comm.html?highlight=reduce#mpi4py.MPI.Comm.reduce>

- **Reduce** est appelée par les processus expéditeurs et destinataires en même temps



```
reduced_buffer = comm.reduce(local_buffer, op=MPI.SUM, root=0)
```

- **Local_buffer** : la valeur à envoyer par chaque processus
- **Received_buffer** : la valeur reçue suite aux échanges et à la réduction par le destinataire seulement
- **Op (MPI_Op)** : type d'opération à effectuer pour la réduction (ex : **MPI_SUM**)
- **root** : le processus qui va recevoir les données réduites

Il existe de multiples opérations de réduction disponibles (`MPI_reduction_operation`) :

- `MPI.SUM` : Somme l'ensemble des données
- `MPI.PROD` : multiplication des données
- `MPI.MAX` : maximum des valeurs
- `MPI.MIN` : minimum des valeurs
- ...

- Réduction de type somme d'une variable réelle sur le processus 0



```
local_value = 125.87 * rank  
sum = comm.reduce(local_value, op=MPI.SUM, 0)
```

- Réduction de type produit d'une variable entière sur le processus 3



```
local_value = 5 * rank  
prod = comm.reduce(local_value, op=MPI.PROD, 3)
```

- Réduction de type max d'un tableau de réels



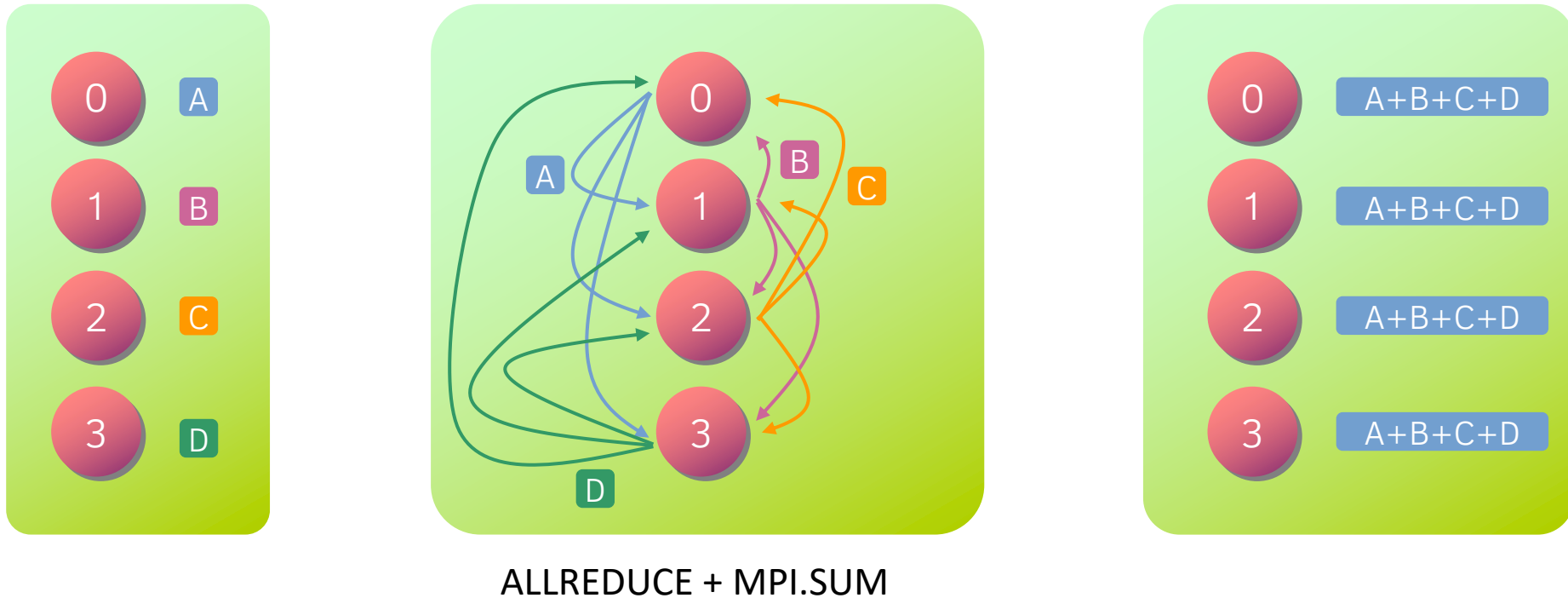
```
# Tableau stocké sur chaque processus
local_array = np.random.rand(5)

# Pour chaque index, on détermine le max de chaque processus
max_array = comm.reduce(local_array , op=MPI.MAX, 0)

# On détermine ensuite le max de tous les index :
max = np.max(max_array)
```


Communication collective : réduction grâce à Allreduce

- Envoi de données réparties sur plusieurs processus vers tous les processus avec une opération de réduction réalisée simultanément



- **MPI.Allreduce** est appelée par les processus expéditeurs et destinataires en même temps



```
sum = comm.allreduce(local_buffer, op=operation)
```

- **Local_buffer** : la valeur à envoyer par chaque processus
- **sum**: la valeur reçue suite aux échanges et à la réduction par le destinataire seulement
- **Opération** : type d'opération à effectuer pour la réduction (ex : **MPI.SUM**)

<https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/reference/mpi4py.MPI.Comm.html?highlight=allreduce#mpi4py.MPI.Comm.allreduce>

- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/8_reduce_com
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/8_reduce_com.md
```

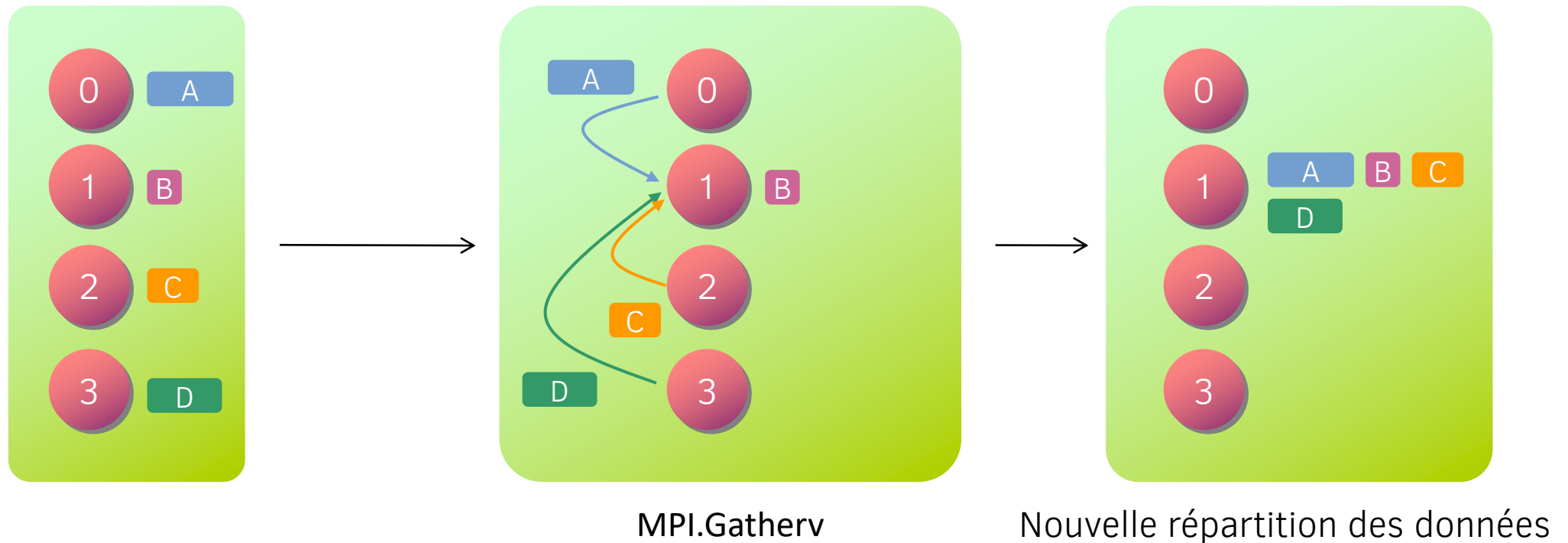
- Cet exercice a pour but de tester les communications collectives de typer MPI reduce

Certaines communications collectives (hors réduction) présentées précédemment imposent que chaque rang échange la même quantité de donnée. Cette limitation peut être levée en utilisant une extension des communications collectives.

Elles possèdent le même nom suivi d'un **v** à la fin :

- Gatherv
- Allgatherv
- Alltoallv
- Scatterv

- Envoi de données de taille différente réparties sur plusieurs processus vers un processus unique



MPI.Gatherv peut également être utilisée pour changer l'ordre des données une fois ramenées sur le rang cible contrairement à **MPI.Gather** qui utilise l'ordre des rangs.

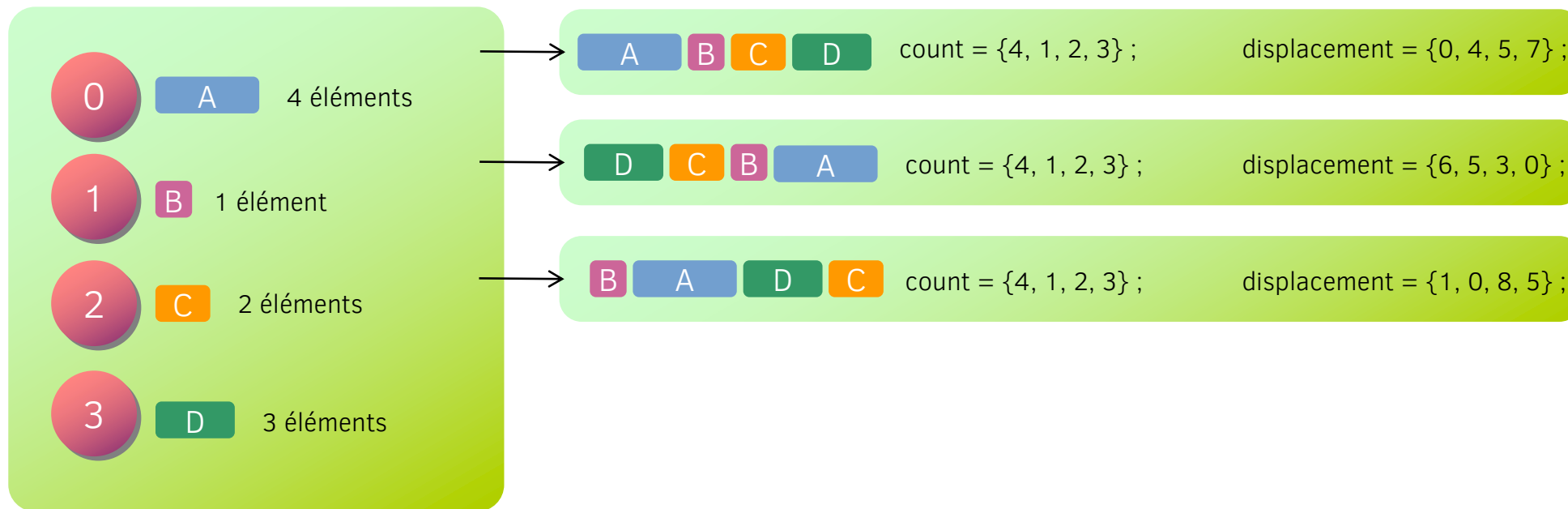
- **MPI_Gatherv** est appelée par les processus expéditeurs et destinataires en même temps



```
comm.Gatherv(send_buffer, [recv_buffer, count, displacement, recv_type], root=0)
```

- **send_buffer** : le tableau à envoyer par chaque processus
- **count** : liste contenant le nombre de valeurs reçues par chaque processus
- **recv_buffer** : le tableau réunissant toutes les valeurs reçues de chaque processus
- **recv_count** : nombre d'éléments reçus pour chaque rang
- **displacement** : où placer chaque contribution dans **recv_buffer**
- **recv_type** (**MPI_Datatype**) : le type des données reçues
- **root** : le processus qui reçoit les données

Le tableau **displacement** permet de **placer les contributions de chaque rang dans le tableau qui reçoit les données**. Il s'agit de l'emplacement de la première donnée venant de chaque rang. Ce tableau doit avoir pour taille le nombre de rang dans le communicateur.



Toutes les communications collectives présentées ont également un équivalent non-bloquant :

- `Igather`
- `Igatherv`
- `Iscatter`
- `Ibcast`
- `Ialltoall`
- `Ireduce`
- ...

D'autres variantes de communications collectives sont à découvrir dans le cours de l'IDRIS et la documentation MPI

A ce stade du cours, vous savez maintenant :

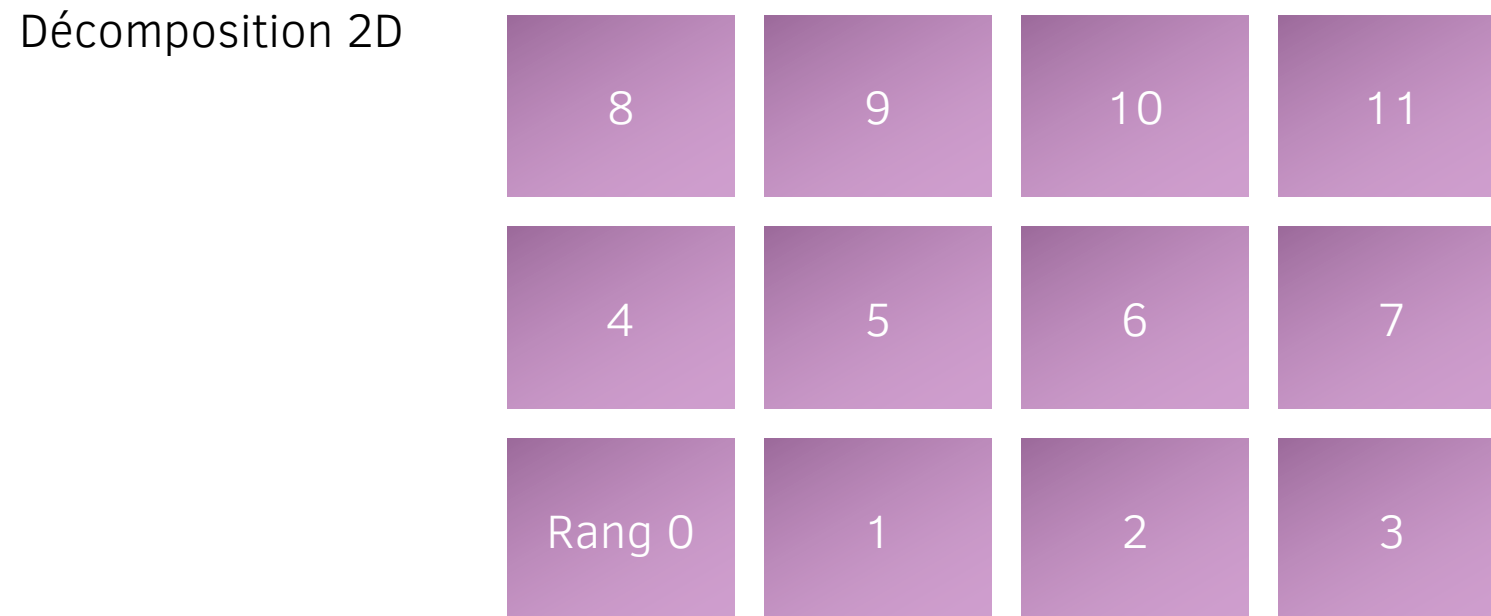
- Effectuer des communications collectives
- Effectuer des réductions

The background of the slide features an abstract composition of glowing, ethereal shapes. A large, translucent blue shape dominates the center, resembling a stylized eye or a lens. Within this blue shape, there is a bright yellow, elongated, comet-like form on the left and a smaller, solid red oval on the right. The overall color palette is dark, with the glowing elements providing a strong contrast.

III. Introduction au parallélisme par échange de messages via MPI

5. Notion de topologie

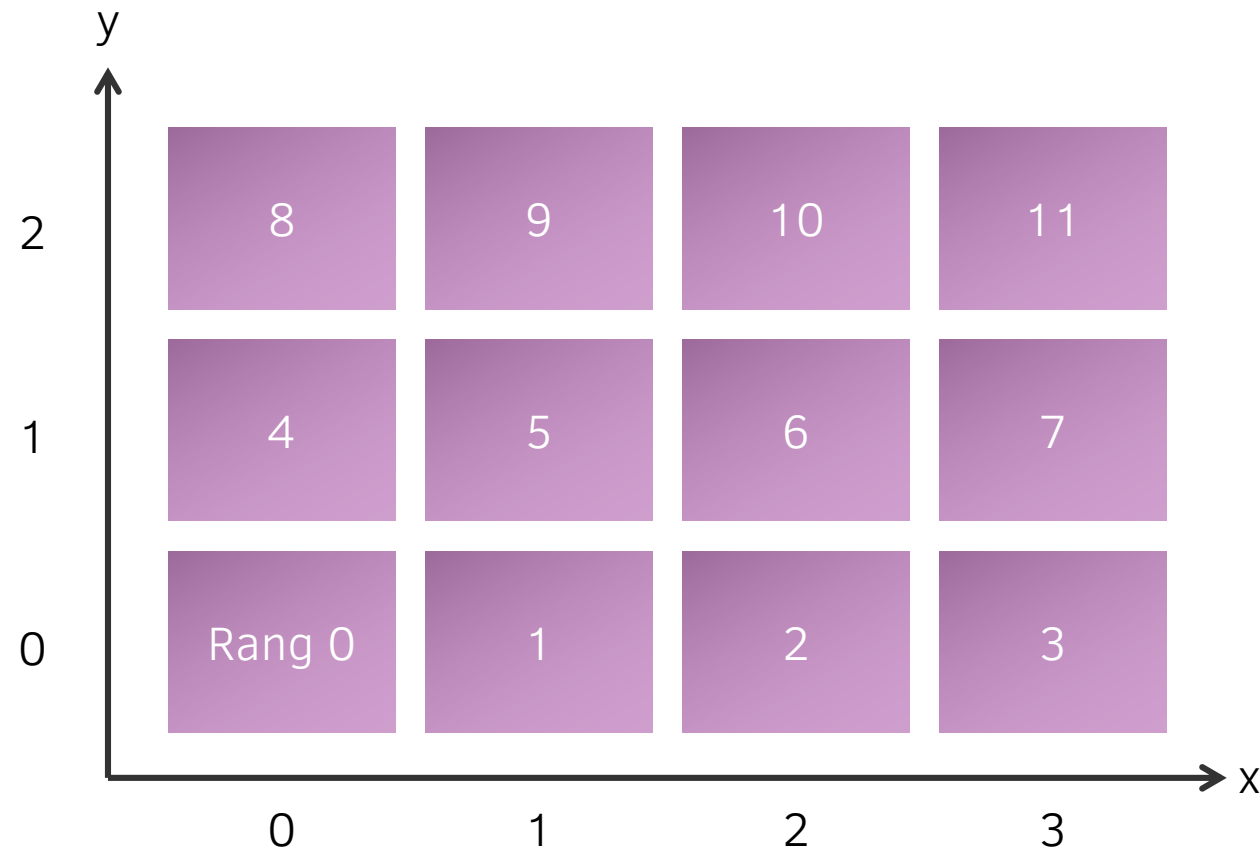
- En calcul scientifique, il est courant de décomposer le domaine d'étude (grille, matrice) en sous-domaines, chaque sous-domaine étant alors géré par un processus MPI unique.
- Sur grille régulière et structurée, une approche simple et classique consiste à diviser le domaine en blocs réguliers possédant alors dans sa mémoire locale une partie unique de la grille globale.
- Méthode de décomposition cartésienne
- Il s'agit d'un exemple typique de parallélisme de donnée



Une **topologie** cartésienne a besoin de :

- **Coordonnées** pour situer les processus (bloc) dans l'espace cartésien
- De **rangs** pour chaque processus en adéquation avec la topologie cartésienne
- exemple : le rang 5 a pour coordonnées (1,1)

Topologie cartésienne 2D



Deux solutions pour mettre en place une topologie cartésienne :

- Le faire à la main
- Faire appel aux fonctions MPI conçues pour ça

- `Create_cart` permet de définir une topologie cartésienne à partir d'un ancien communicateur (celui par défaut par exemple `MPI_COMM_WORLD`)



```
cartesian_comm = comm.Create_cart(dimensions, periodicity, reorder=True)
```

- `comm`: communicateur à partir duquel on construit la topologie (`MPI_COMM_WORLD` par exemple)
- `dimensions` : liste contenant le nombre de processus dans chaque direction. La dimension de la liste détermine la dimension de la topologie.
- `Periodicity` : liste de booléens permettant de définir si chaque direction est périodique (`true`) ou non (`false`)
- `Reorder` : booléen permettant de réorganiser les rangs pour optimiser les échanges
- `cartesian_comm` : nouveau communicateur renvoyé par la fonction définissant une topologie cartésienne

Comme pour n'importe quel communicateur, on peut récupérer les rangs dans le communicateur cartésien (`cartesian_communicator`) avec `MPI_COMM_RANK`

- **Get_coords** permet de récupérer les coordonnées d'un rang donné dans la topologie cartésienne.



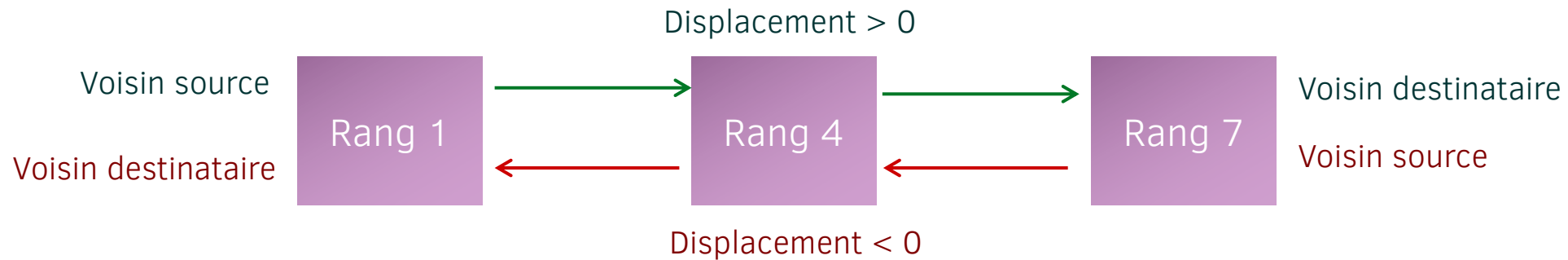
```
cart_coords = cart_comm.Get_coords(rank)
```

- **rank** : rang du processus MPI
- **cart_coords** : les coordonnées du rang **rank** dans le communicateur cartésien **cart_comm**

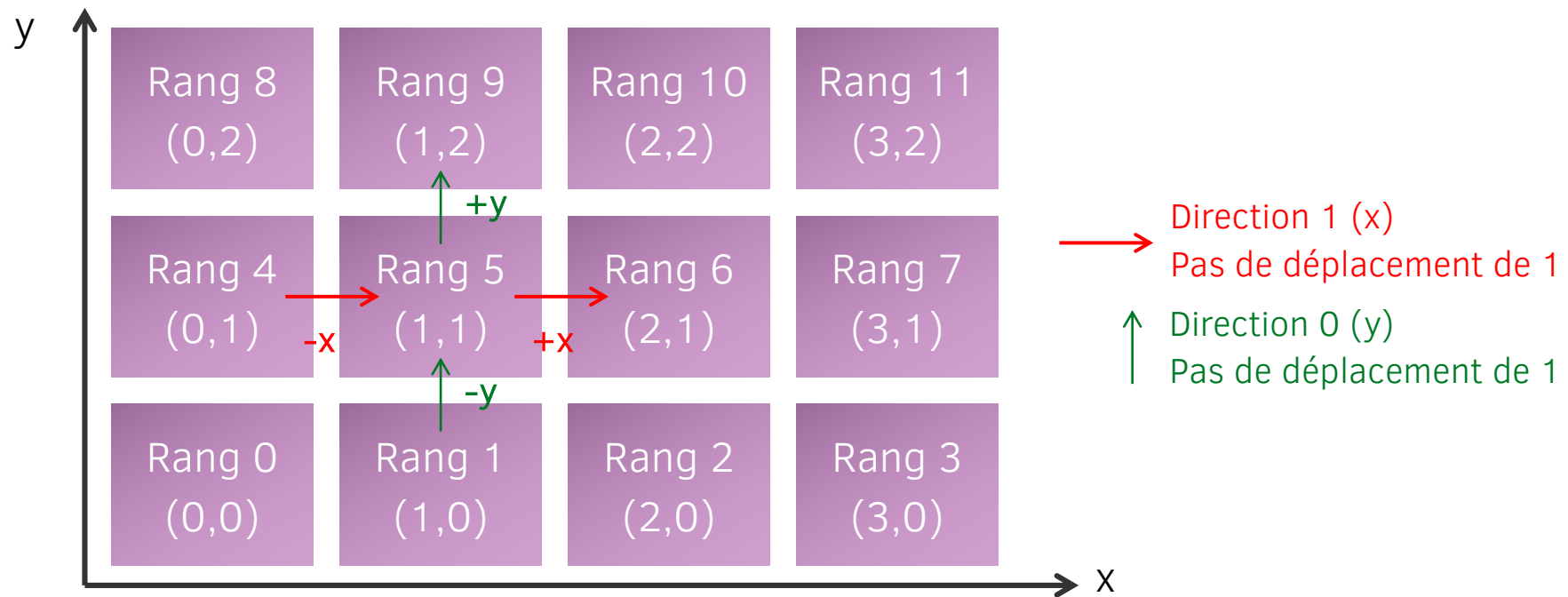
Chaque processus doit être en mesure de récupérer **le rang de ses voisins** dans la topologie cartésienne pour d'éventuelles communications.



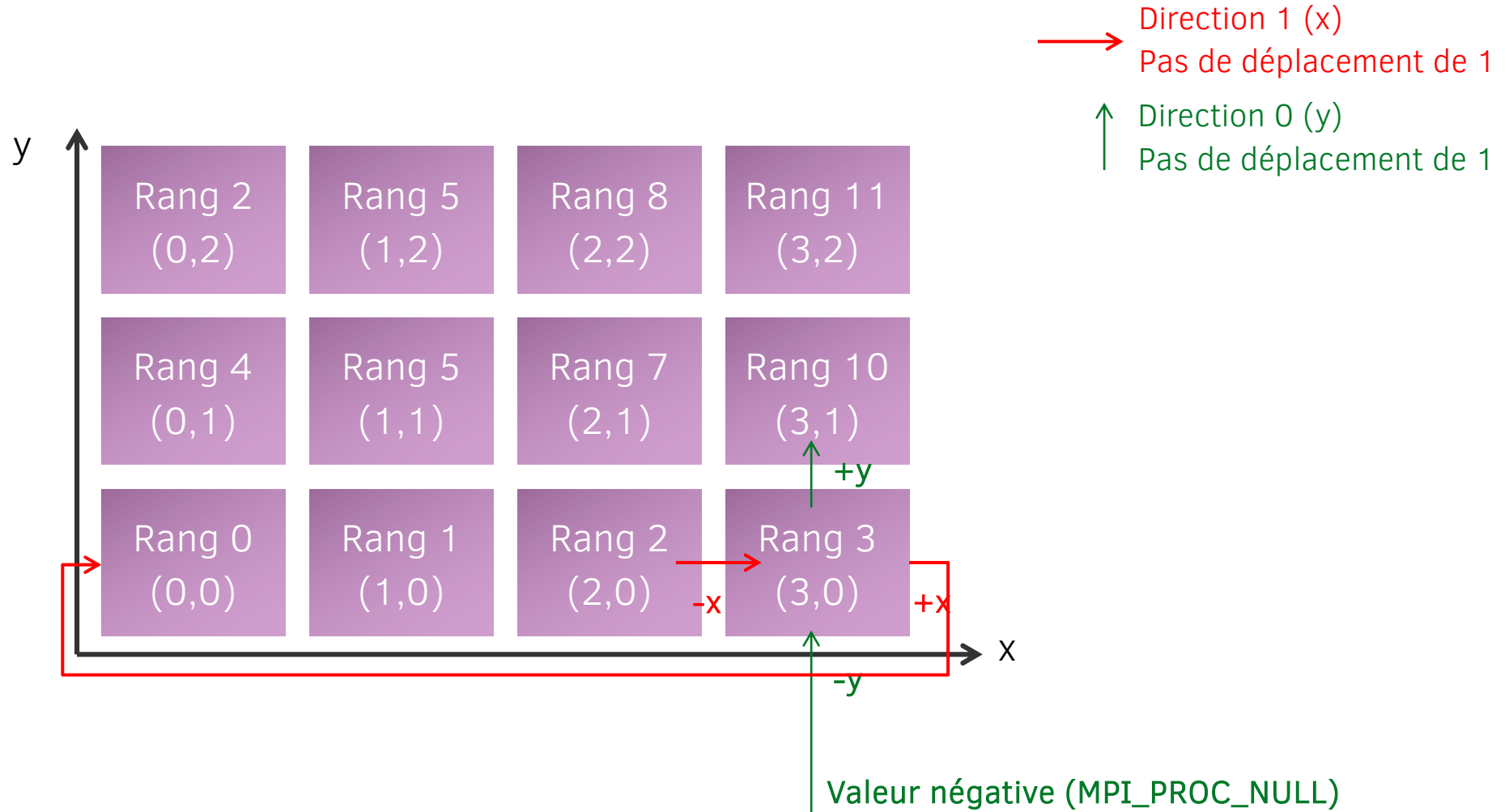
Shift permet de récupérer les rangs voisins d'un rang donné en spécifiant une direction et un sens de déplacement. On récupère 2 voisins dans la philosophie MPI_Sendrecv : **un rang source** et **un rang destinataire**.



Exemple de topologie cartésienne 2D



Exemple de topologie cartésienne 2D : notion de périodicité

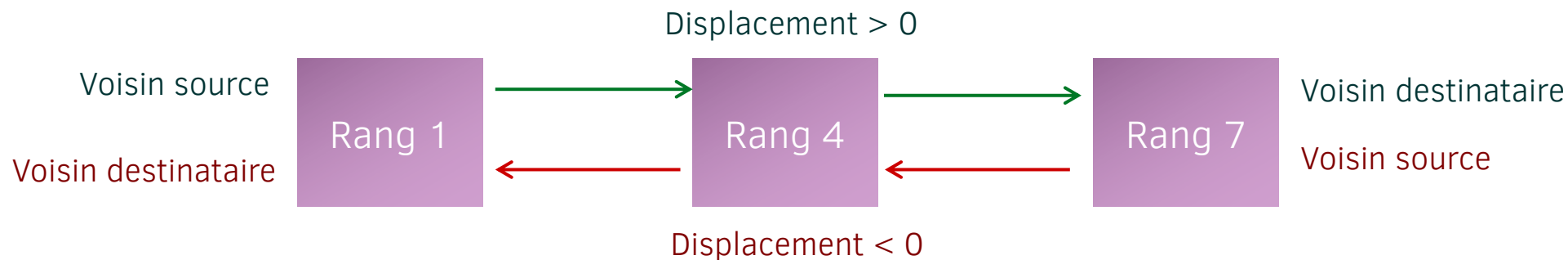


Shift permet de récupérer les rangs voisins d'un rang donné



```
[left_rank, right_rank] = cart_comm.Shift(direction, displacement)
```

- **direction** (int) : 0 pour la première coordonnée, 1 pour la deuxième coordonnée, etc
- **displacement** (int) : pas de déplacement dans la direction souhaitée, si > 0 déplacement vers les coordonnées supérieures, si < 0 vers les coordonnées inférieures
- **rank_left** : si $\text{displacement} > 0$, correspond au voisin de gauche
- **rank_right** : si $\text{displacement} > 0$, correspond au voisin de droite



- Lorsqu'un **rang n'a pas de voisin** (par exemple en non-périodique), **Shift** renvoie le même contenu que la variable **MPI.PROC_NULL**.
- Lorsqu'une communication a pour destinataire ou expéditeur **MPI.PROC_NULL**, elle peut être écrite mais la communication est simplement ignorée. Cela permet de gérer la périodicité sans avoir à multiplier les conditions par exemple.
- Vérifier si un voisin est égal à **MPI.PROC_NULL** revient à vérifier si le rang est sur le bord de la topologie en non périodique



```
left_rank = cart_comm.Shift(0, 1)[0]
```

```
If (left_rank == MPI.PROC_NULL):  
    # Ce rank est sur le bord par définition
```


Exemple de topologie cartésienne 3D



```
# On définit le nombre de dimensions
ndims = 3

# On définit le nombre de processus par dimension
dims = [4, 5, 2]

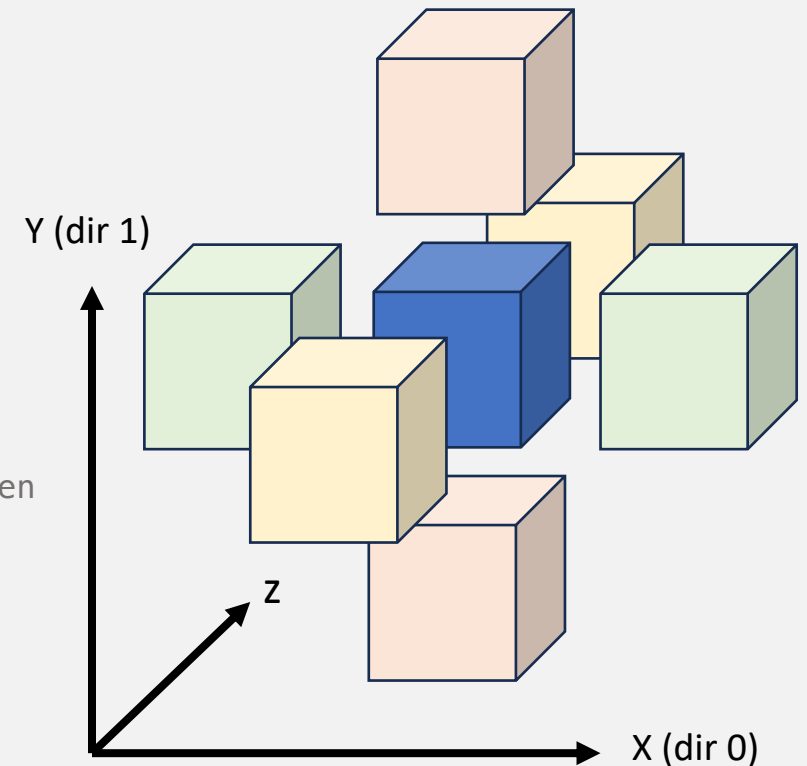
# On définit si les dimensions sont périodiques ou non
periods = [False, False, True]

# On crée le communicateur cartésien
cart_comm = comm.Create_cart(dims, periods, reorder=True)

# On récupère le rang dans le communicateur cartésien
cart_rank = cart_comm.Get_rank()

# On récupère les coordonnées du rang dans le communicateur cartésien
cart_coords = cart_comm.Get_coords(cart_rank)

# On récupère le rang du processus voisin dans la dimension 0
# avec un décalage de +1
left_rank = cart_comm.Shift(0, 1)[0]
right_rank = cart_comm.Shift(0, 1)[1]
```



Exercice 9 : Utilisation de la topologie cartésienne

- Page de l'exercice : https://github.com/Maison-de-la-Simulation/HPC-DFE-Paris-Saclay/tree/master/exercices/mpi/python/9_cartesian_topology
- Vous pouvez aussi y accéder via votre éditeur en ouvrant le fichier suivant :



```
> cd exercices/mpi/python/9_cartesian_topology.md
```

- Cet exercice a pour but de tester les communications collectives de typer MPI reduce

A ce stade du cours, vous savez maintenant :

- Créer un communicateur cartésien pour décomposer vos données
- Utiliser les fonctions liées à la décomposition cartésienne