

**Parallélisation d'Automates Cellulaires uni- et  
bi-dimensionnels et application à la modélisation du  
processus de subduction-érosion en tectonique des  
plaques**

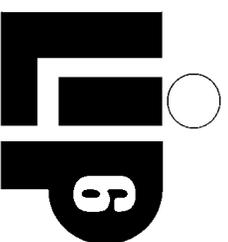
*RenPar'10 - Strasbourg - juin 1998*

Thomas LEDUC

Laboratoire LIP6 - Université Pierre et Marie Curie,

4, place Jussieu, F-75252 PARIS Cedex 05

Thomas.Leduc@lip6.fr



## Contenu de l'exposé

- 3 Le contexte géotectonique
- 5 Le Sand Pile Model
- 6 Modélisation par systèmes dynamiques discrets
- 10 Simulation parallèle par automate cellulaire 2D
- 19 Création d'une plate-forme logicielle spécifique
- 20 Références bibliographiques d'introduction
- 20 Sites Web

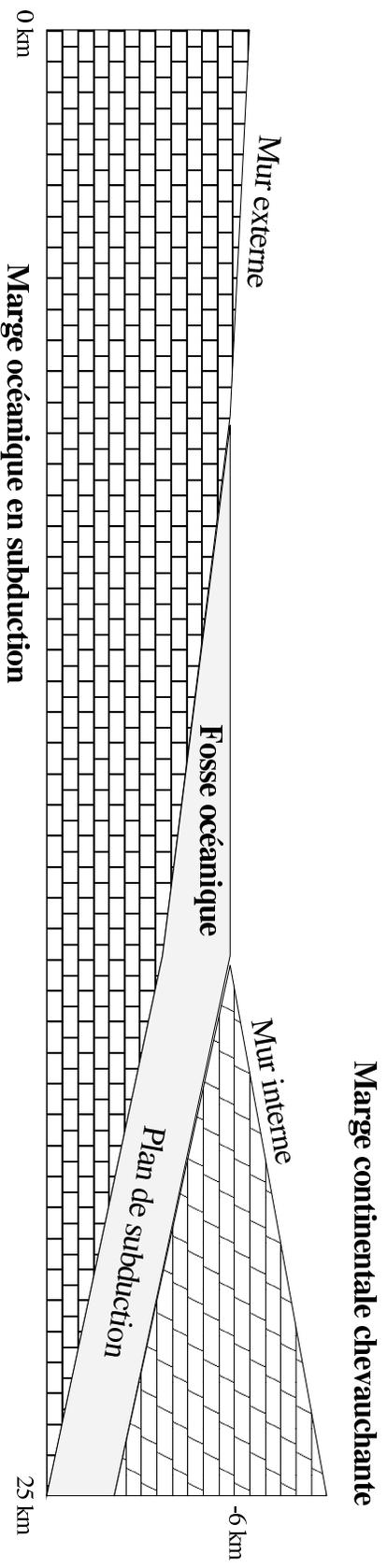
► [4, 5, 1, 2, 6, 3]



## Le contexte géotectonique

- ▶ structure du globe terrestre
  - une mosaïque de calottes sphériques (les plaques lithosphériques) d'une centaine de kilomètres d'épaisseur, flottant sur l'asthénosphère,
  - on distingue la lithosphère océanique de la lithosphère continentale,
- ▶ dynamique des plaques
  - mouvements "verticaux" (principe d'isostasie, variation "régionale" de l'état thermique),
  - mouvements relatifs des plaques de l'ordre de 10 cm/an (moteur : courants de convection mantellique → *slab pull* à 95%, *ridge push* et effet "tapis-roulant" à 5%).

- ▶ types d'interface entre plaques : marges convergentes (processus soustractif avec destruction), marges divergentes (processus additif avec expansion), marges coulissantes...



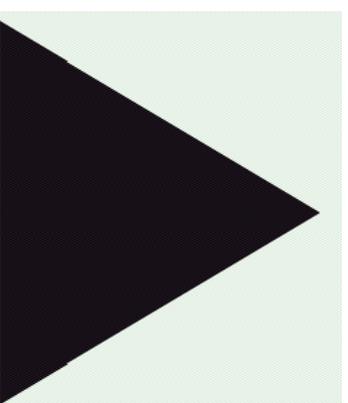
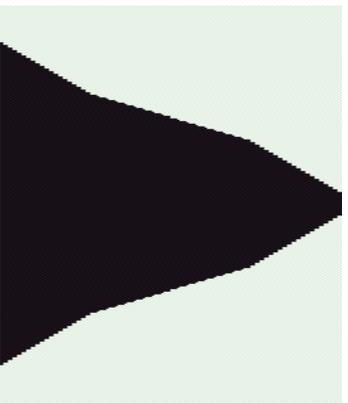
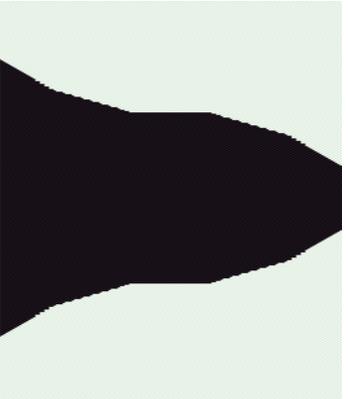
- ▶ 3 types de régime dans le cas des marges convergentes : accrétif, intermédiaire et érosif (corrélation avec l'angle d'ouverture du chenal de subduction),

## Le Sand Pile Model

- ▶ initialement conçu pour la modélisation des avalanches en physique de l'état granulaire (Bak, Tang et Wiesenfeld, années 80),
- ▶ SPM 1D : ligne d'automates cellulaires (un automate = hauteur de la pile de grains), loi de transition du type :

$$\text{avec } \mathbb{I}(n) = \begin{cases} 0 & \text{si } n \geq 2 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

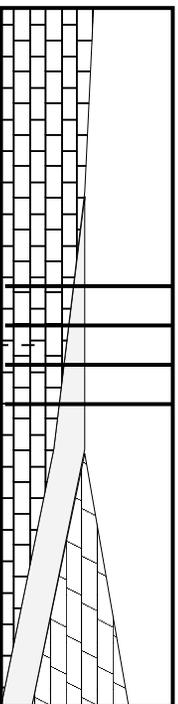
$$C_j^{t+1} = C_j^t - \mathbb{I}(C_j^t - C_{j-1}^t) - \mathbb{I}(C_j^t - C_{j+1}^t) + \mathbb{I}(C_{j-1}^t - C_j^t) + \mathbb{I}(C_{j+1}^t - C_j^t)$$



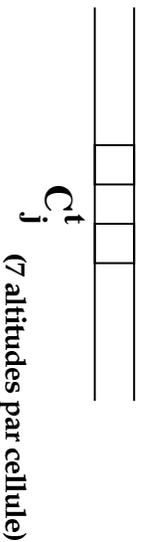
## Modélisation par systèmes dynamiques discrets

⇒ la conjunction de règles élémentaires locales engendre des comportements d'ensemble complexes.

### Automate cellulaire 1D

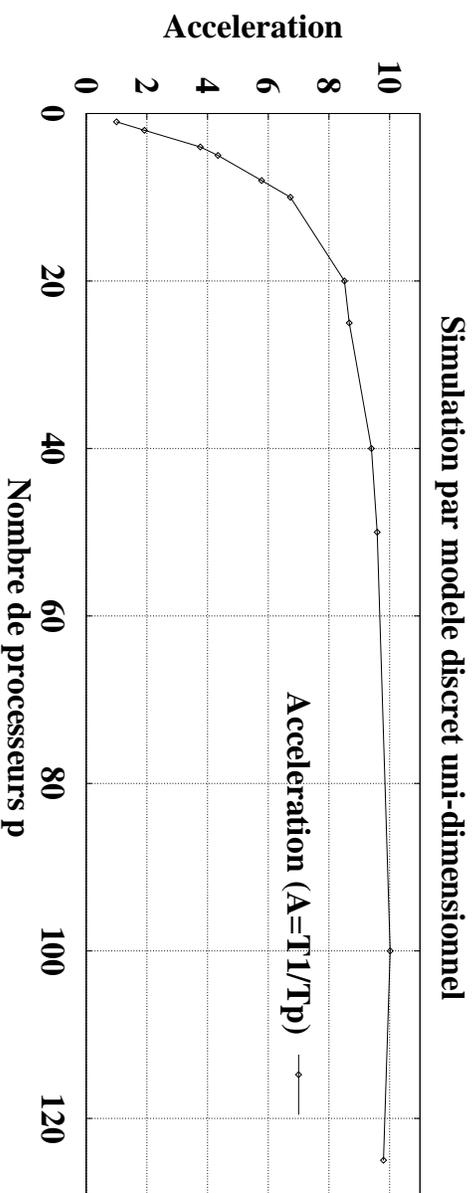
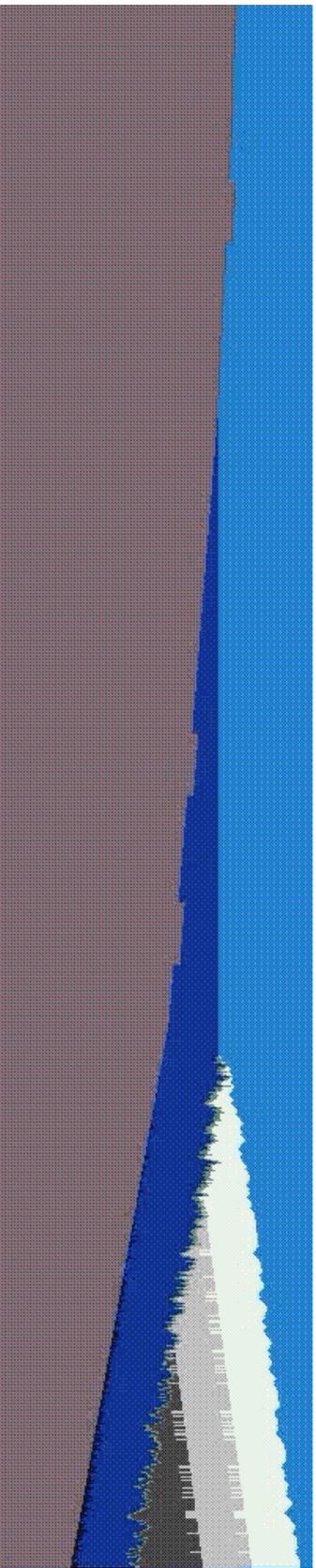


Vecteur de cellules :  $C^t$



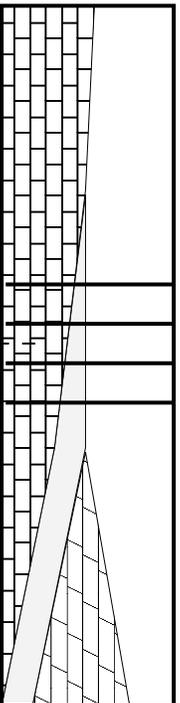
- ▶ première approche par modèle 1D (fortement inspiré du *Sand Pile Model*) : la coupe verticale de subduction est discrétisée dans le sens longitudinal,
- ▶ état d'une cellule = 8 entiers bornés (épaisseurs de couches + un coefficient de vieillissement). Chaque cellule peut donc prendre un nombre fini d'états ;
- ▶ à chaque pas de temps, réévaluation parallèle, synchrone de l'état de chacune des 1000 cellules en fonction de la donnée de la cellule courante et des deux cellules contigües au pas de temps précédent.

- rendu visuel et accélération de la simulation 1D (traitement en C + PVM sur CRAY T3E et post-traitement graphique sur Silicon Graphics avec l'utilitaire *Convert* du logiciel *ImageMagick*),

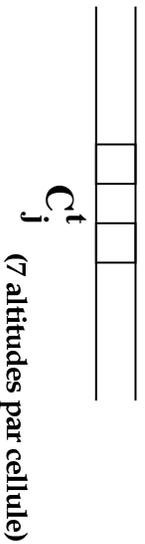


- ▶ de la nécessité d'affiner le modèle avec un automate cellulaire 2D :
  - une cellule correspond désormais à une portion d'espace homogène,

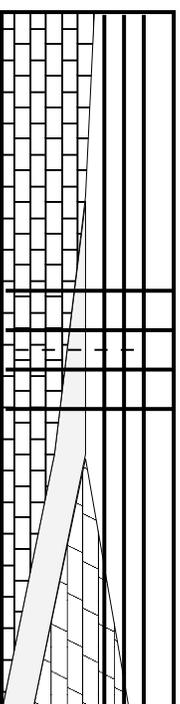
Automate cellulaire 1D



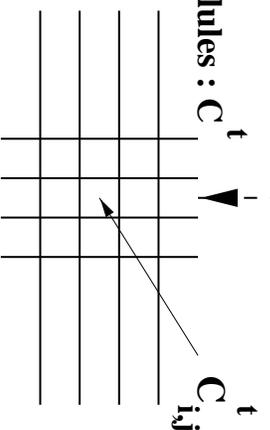
Vecteur de cellules :  $C^t$



Automate cellulaire 2D

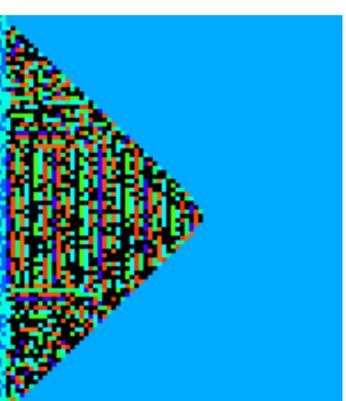
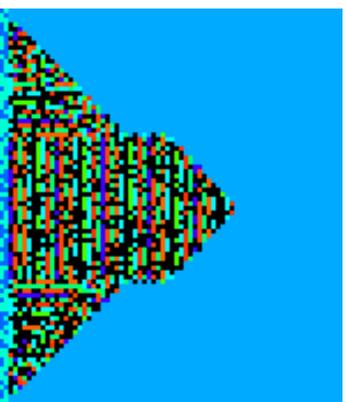
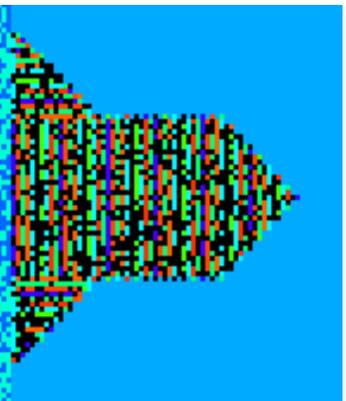


Matrice de cellules :  $C^t$



- à chaque pas de temps, réévaluation parallèle, synchrone de l'état de chacune des 200000 cellules en fonction de la donnée de la cellule courante et de ses 24 voisines immédiates (cellules contigües et cellules contigües des cellules contigües) aux pas de temps précédent,

- pour poursuivre l'analogie avec le SPM :
- \* cas du SPM 2D : chaque cellule contient, par exemple, une information de "couleur" (cf figure ci-dessous),
- \* cas de notre modèle : chaque cellule contient une information de nature, de couleur (permet de tracer des repères au sein d'une couche donnée), de mémoire de son mouvement propre et de la "courbure" courante, de vieillissement...



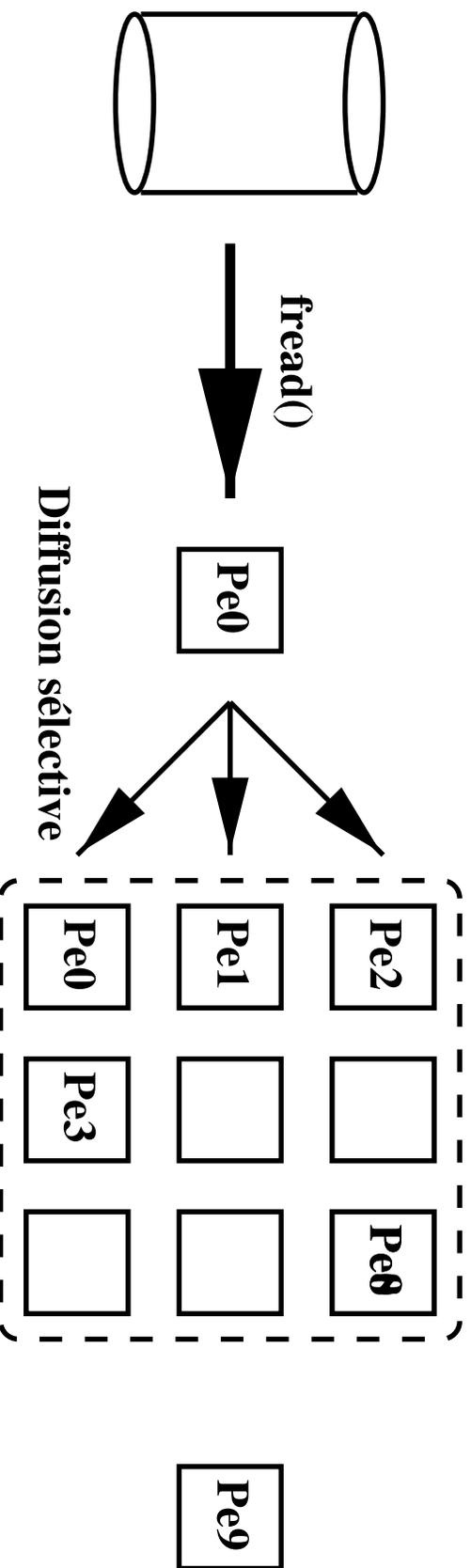
## Simulation parallèle par automate cellulaire 2D

- ▶ stratégie : parallélisation du code à l'aide d'une décomposition de domaine (autant de sous-domaines que de processus moins un) sur architecture à mémoire distribuée. Modèle de programmation SPMD : un seul et même code s'exécute sur chacun des sous-domaines ;
- ▶ problème : les entrées-sorties,
- ▶ solution adoptée : partitionnement de l'ensemble des  $P_e$  en un ensemble "d'itérateurs" d'une part et un "superviseur" d'autre part,
  - les itérateurs correspondent chacun à un sous-domaine du réseau d'automates, effectuent des calculs au niveau local et échangent les données aux interfaces via des communications par messages. Enfin, ils envoient périodiquement leur portion d'image calculée au superviseur ;
  - le superviseur collecte périodiquement les diverses portions d'image et écrit

l'image reconstituée sur le disque.

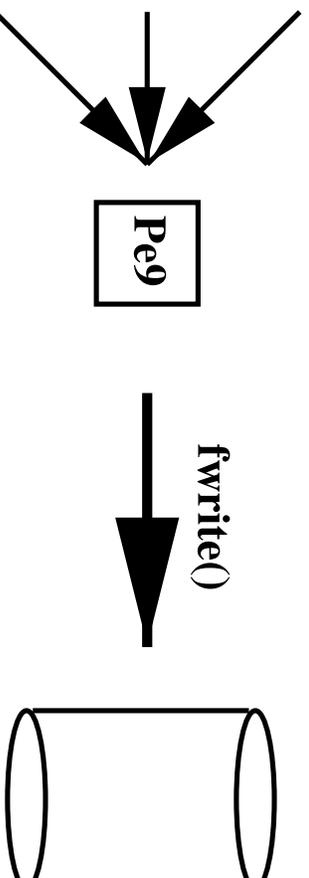
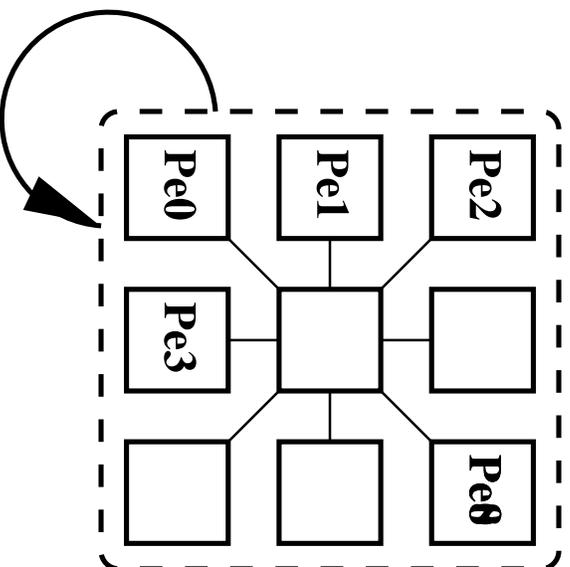
- utilisation de fonctionnalités propre à la bibliothèque MPI : topologie virtuelle de processus et types de données dérivés.

### Initialisation - modèle à 10 Pe



- ▶ partitionnement du communicateur `MPI_COMM_WORLD` en deux sous communicateurs avec la primitive `MPI_Comm_split()`,
- ▶ les "itérateurs" sont chargés d'itérer l'automate cellulaire en temps,
- ▶ un itérateur donné effectue donc un ensemble de traitements et, ceux-ci étant réalisés, il échange ses données aux frontières avec les huit sous-domaines voisins,
- ▶  $\Rightarrow$  ils sont disposés sur une topologie cartésienne virtuelle régulière à deux dimensions appelée `GRILLE_2D`, créée avec la primitive `MPI_Cart_create()`.

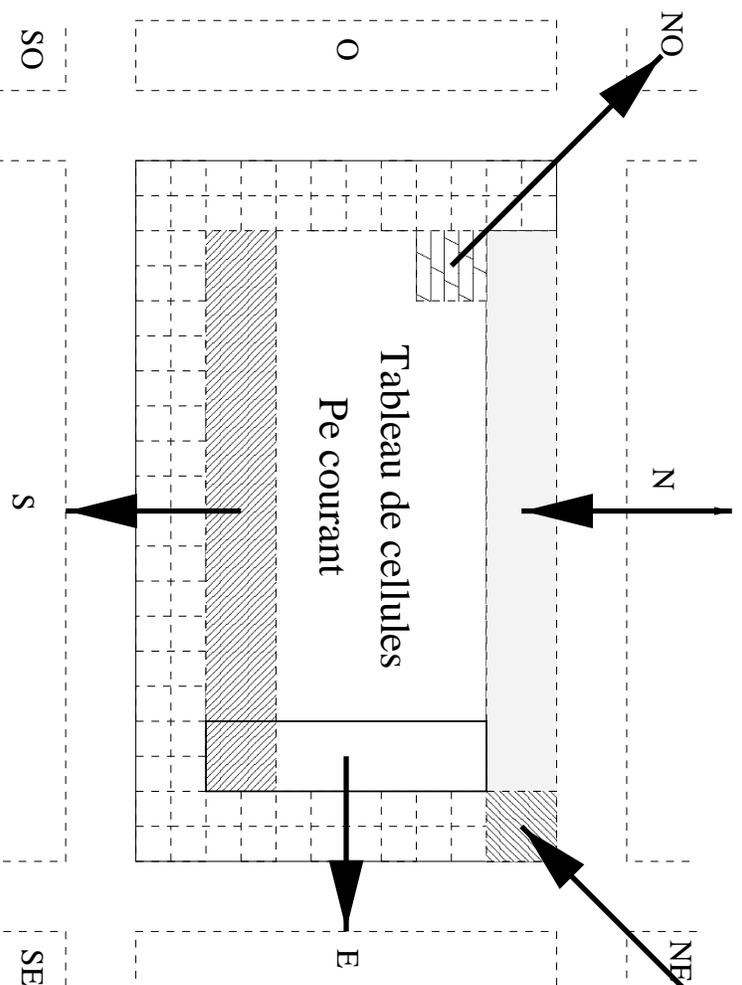
## Itérations (date $t$ ) - modèle à 10 $P_e$



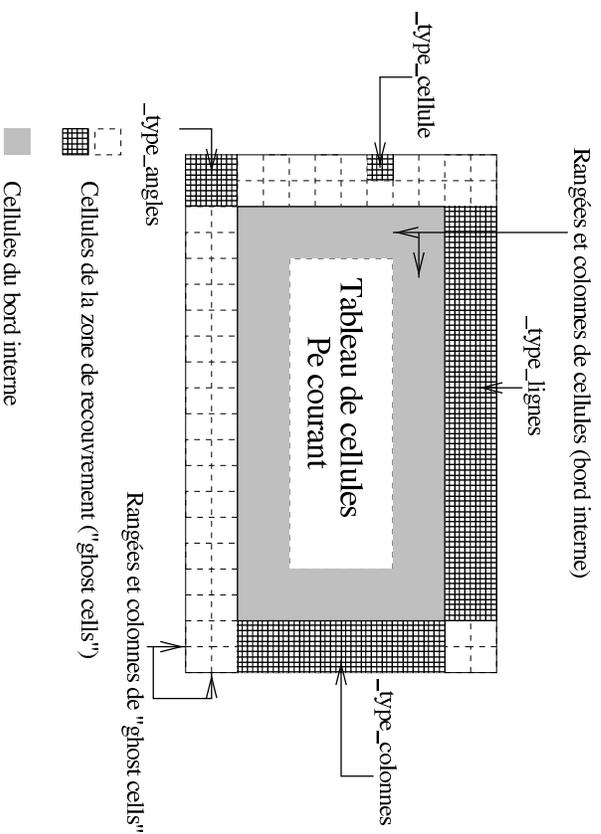
Collecte sélective  
des portions d'image à intervalle de temps réguliers

Itération en temps avec communications locales des bords à chaque pas de temps

- ▶ dans les communications point à point "locales" de notre code, les données échangées sont de types plus élaborés que les types "simples" classiques,
- ▶ chaque  $Pe$  échange à chaque pas de temps deux lignes de cellules avec ses voisins N et S, deux colonnes de cellules avec ses voisins O et E, et des "angles" de quatre cellules avec ses voisins NO, NE, SO, SE,



- ▶ ⇒ création de types dérivés<sup>a</sup>,
  - type `_Type_cellule` (type hétérogène, primitive `MPI_Type_struct()`),
  - types `_Type_lignes`, `_Type_colonnes`, `_Type_angles` (types homogènes vectoriels à pas constants dérivés de `_Type_cellule`, primitive `MPI_Type_vector`).

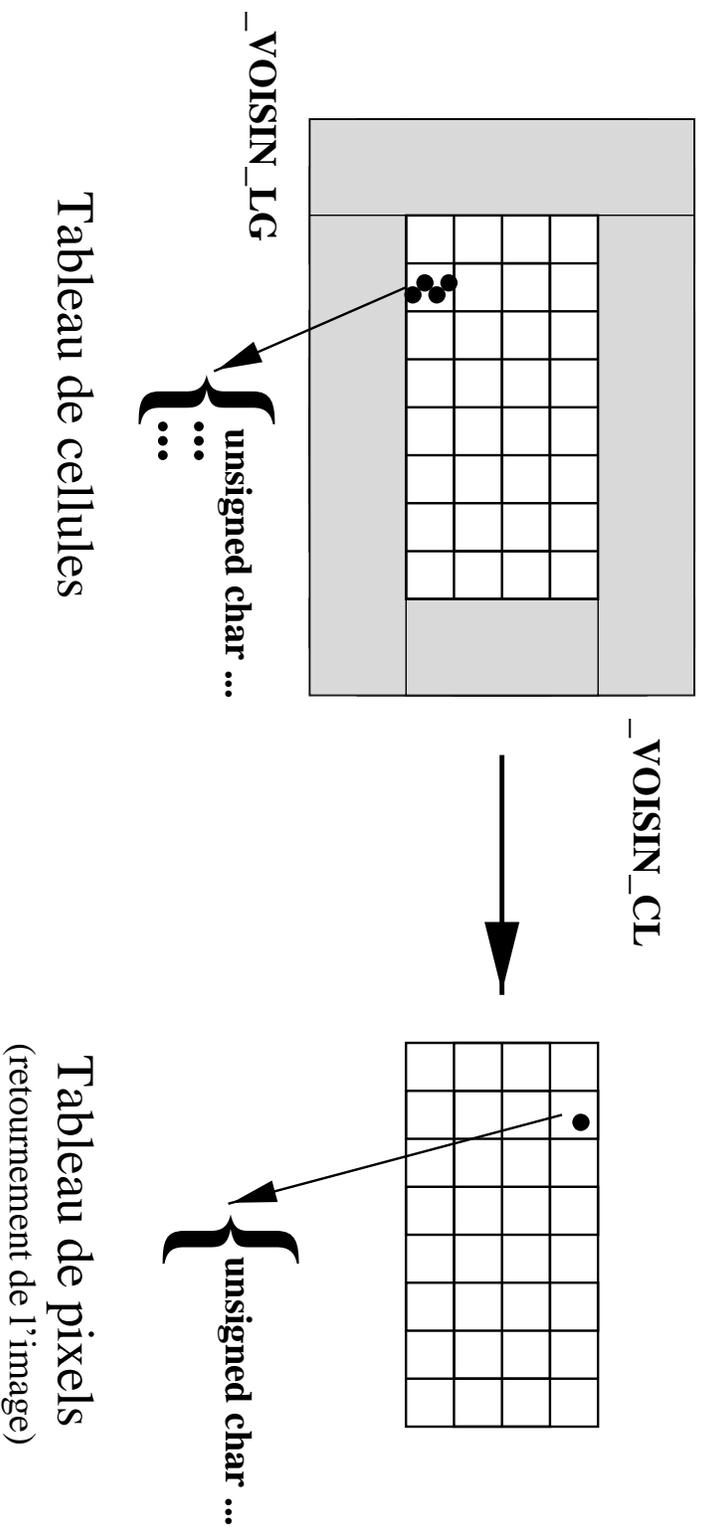


<sup>a</sup> Avec une bibliothèque d'échanges de message classique comme PVM, l'envoi et la réception de tels blocs de données auraient nécessité l'écriture d'un certain de nombre de boucles et entraîné, du même coup, des sur-coûts de compactage/décompactage et de recopie des contenus de messages.

► enfin, pour la collecte des résultat sur le superviseur : création de deux types dérivés :

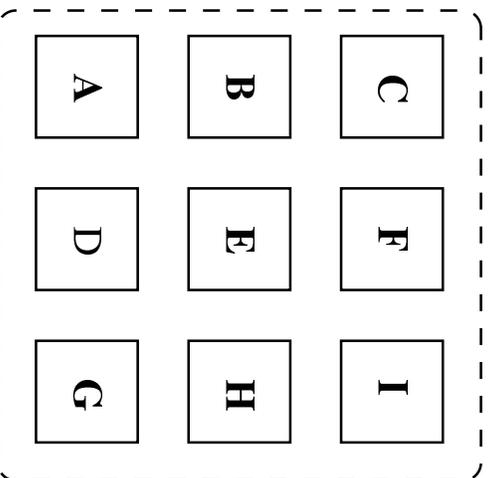
- un `_Type_bloc_image` (type homogène à pas variable où le tableau de cellules est considéré comme un tableau d'octets, primitive `MPI_Type_indexed`),

### Extraction et retournement des pixels d'un Pe quelconque

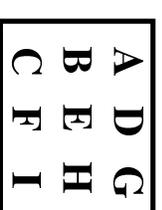


- un type `_Type_image_globale` (type homogène à pas constant, primitive `MPI_Type_vector`).

## Collecte et retournement des blocs d'image sur le superviseur



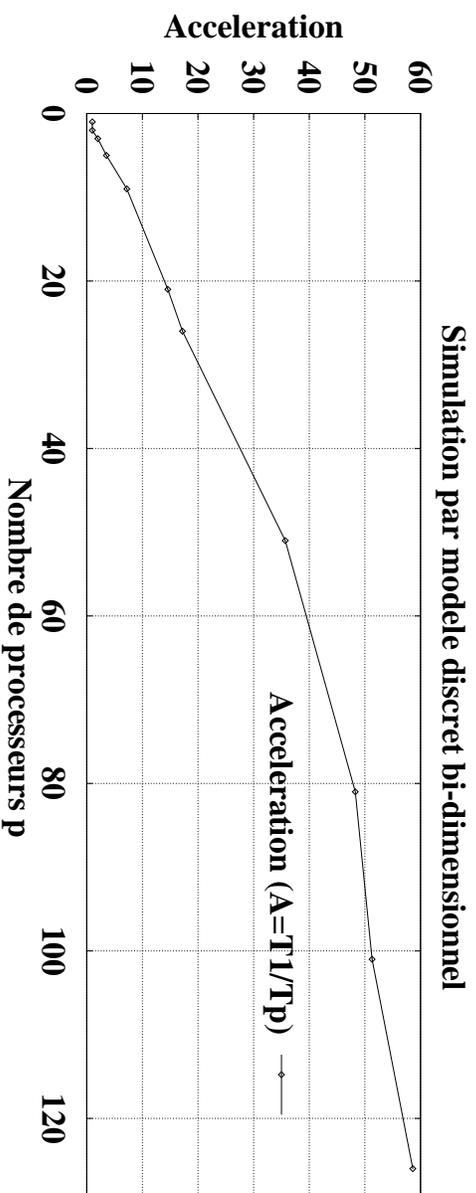
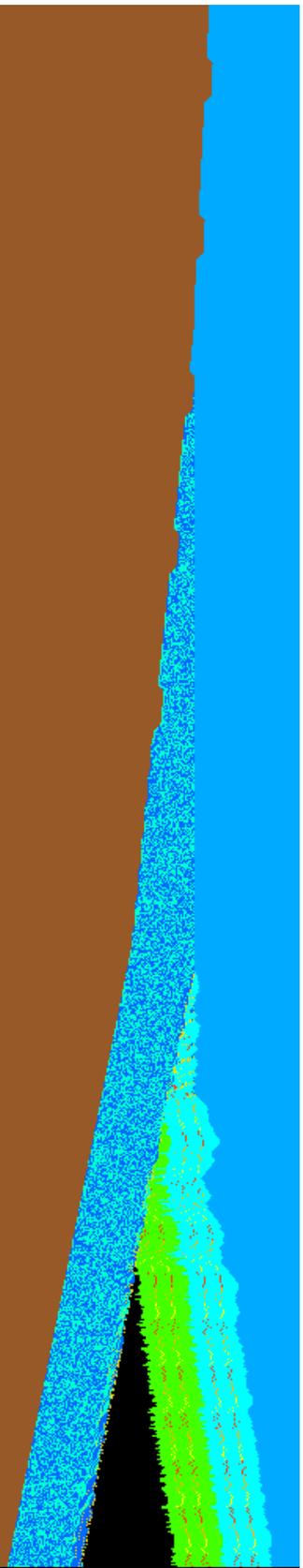
Collecte et "retournement"



Pe superviseur

Topologie cartésienne de Pe "itérateurs"

- rendu visuel et accélération de la simulation 2D (traitement en C + MPI sur CRAY T3E et post-traitement graphique sur Silicon Graphics avec l'utilitaire *Convert* du logiciel *ImageMagick*),



## Création d'une plate-forme logicielle spécifique

- ▶ la plate-forme  $\mathcal{LAC}$  (= Langage pour Automates Cellulaires) qui est en cours de développement est composée de :
  - un langage propre dédié à la programmation des automates cellulaires,
  - un petit compilateur associé<sup>a</sup> qui génère du code C avec des appels aux primitives de la bibliothèque d'échange de messages MPI (pour le parallélisme),
  - une interface graphique<sup>b</sup> pour l'initialisation de l'automate cellulaire.
- ▶ cette plate-forme est écrite de telle façon qu'elle peut-être utilisée pour tous les automates cellulaires bi-dimensionnels.

---

<sup>a</sup>Écrit avec Lex et Yacc.

<sup>b</sup>Écrite en Perl/TK.

## Références bibliographiques d'introduction

- Gilbert BOLLLOT. *La dynamique de la lithosphère*. Enseignement des Sciences de la Terre. Masson, 1996. Glossaire par Jacques BOUTLER.
- Jacques BOURGOIS. La fosse d'Amérique Centrale : convergence, accréation, érosion tectonique. *C.R. Acad. Sci., Sér. Gén., Vie Sci.*, 10(4):285–303, 1993.
- Isabelle BRUGEAS. Utilisation de MPI en décomposition de domaine. <http://www.idris.fr>, mars 1996. Publication IDRIS.
- Jacques DURAN. La physique du tas de sable. *Revue du Palais de la Découverte*, 23(224):21–39, janvier 1995.
- Heinrich M. JAEGER and Sidney R. NAGEL. La physique de l'état granulaire. *La Recherche*, 23(249):1380–1387, décembre 1992.
- Serge LALLEMAND and Jacques MALAVIEILLE. L'érosion profonde des continents. *La Recherche*, 23(249):1388–1397, décembre 1992.

## Sites Web

- ▶ <http://quartz.dgs.jussieu.fr:8080/ANIM/>
- ▶ <http://www.cs.runet.edu/~dana/ca/cellular.html>
- ▶ <http://penguin.phy.bnl.gov/www/xtoys.html>