

**Modélisations par réseaux d'automates cellulaires et  
simulations parallèles du phénomène de subduction-érosion  
en tectonique des plaques**

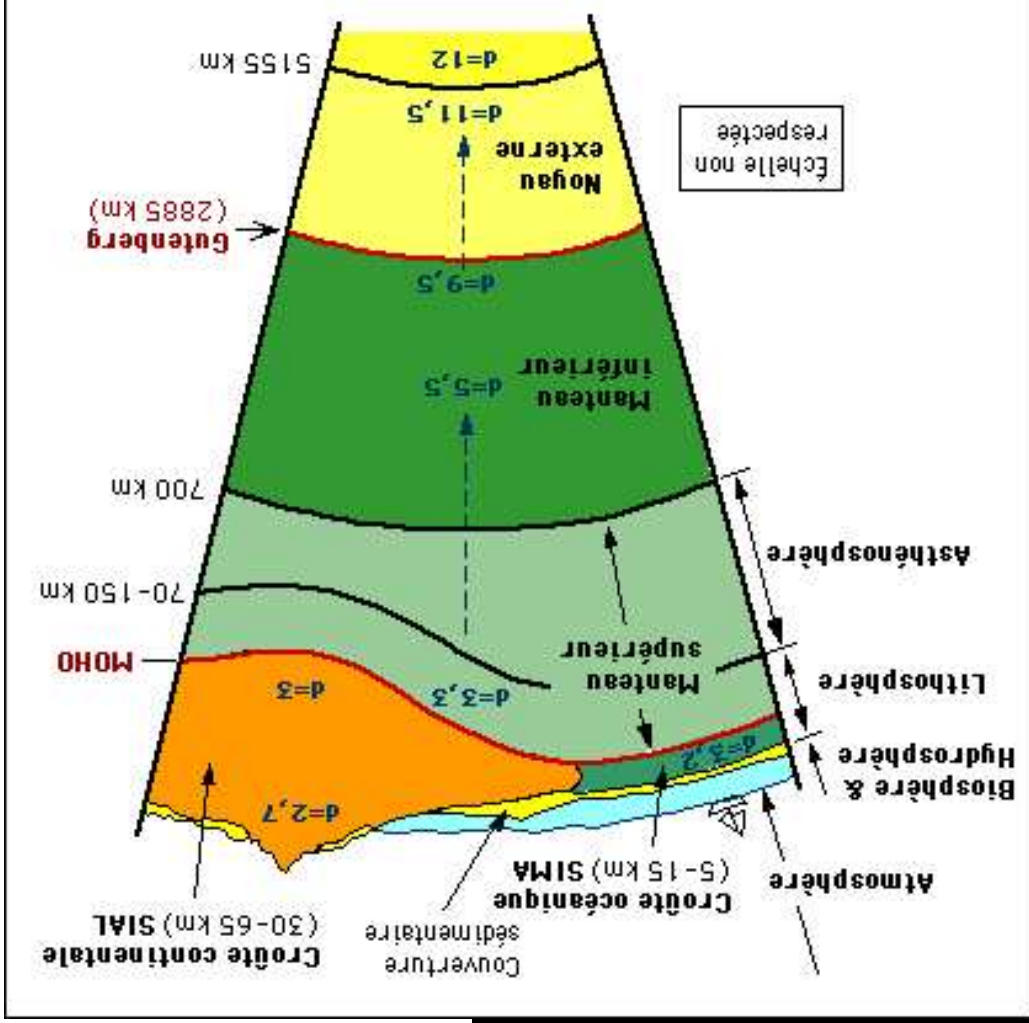
**Thomas LEDUC**

**Juillet 1999**

## Contenu de l'exposé

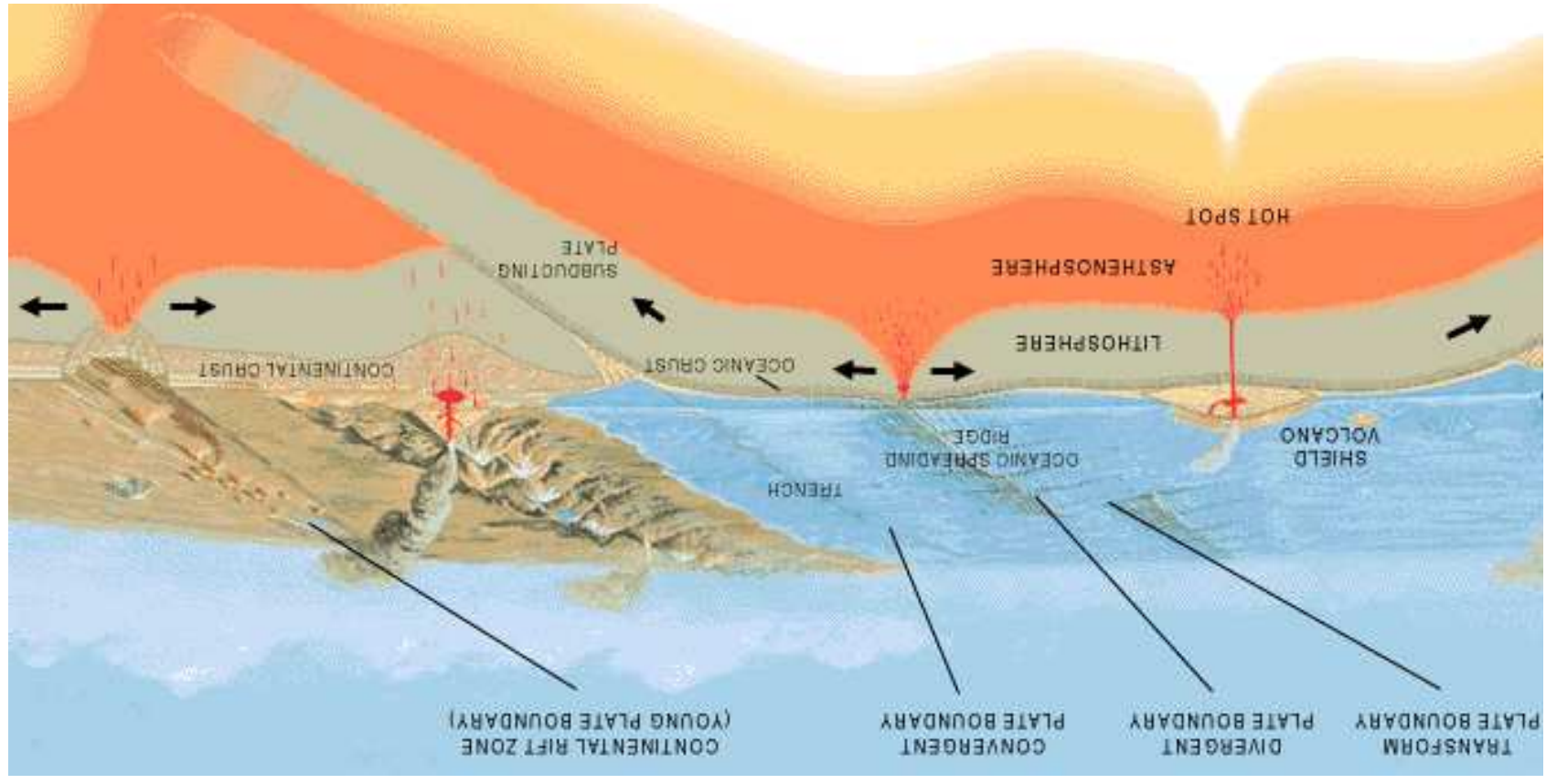
- ➡ rappels sur la tectonique des plaques,
- ➡ choix d'une modélisation discrète et SPM,
- ➡ présentation des modèles,
- ➡ présentation des simulations et de leurs optimisations parallèles,
- ➡ résultats et performances,
- ➡ conclusion et évolutions.

# Le contexte géotectonique

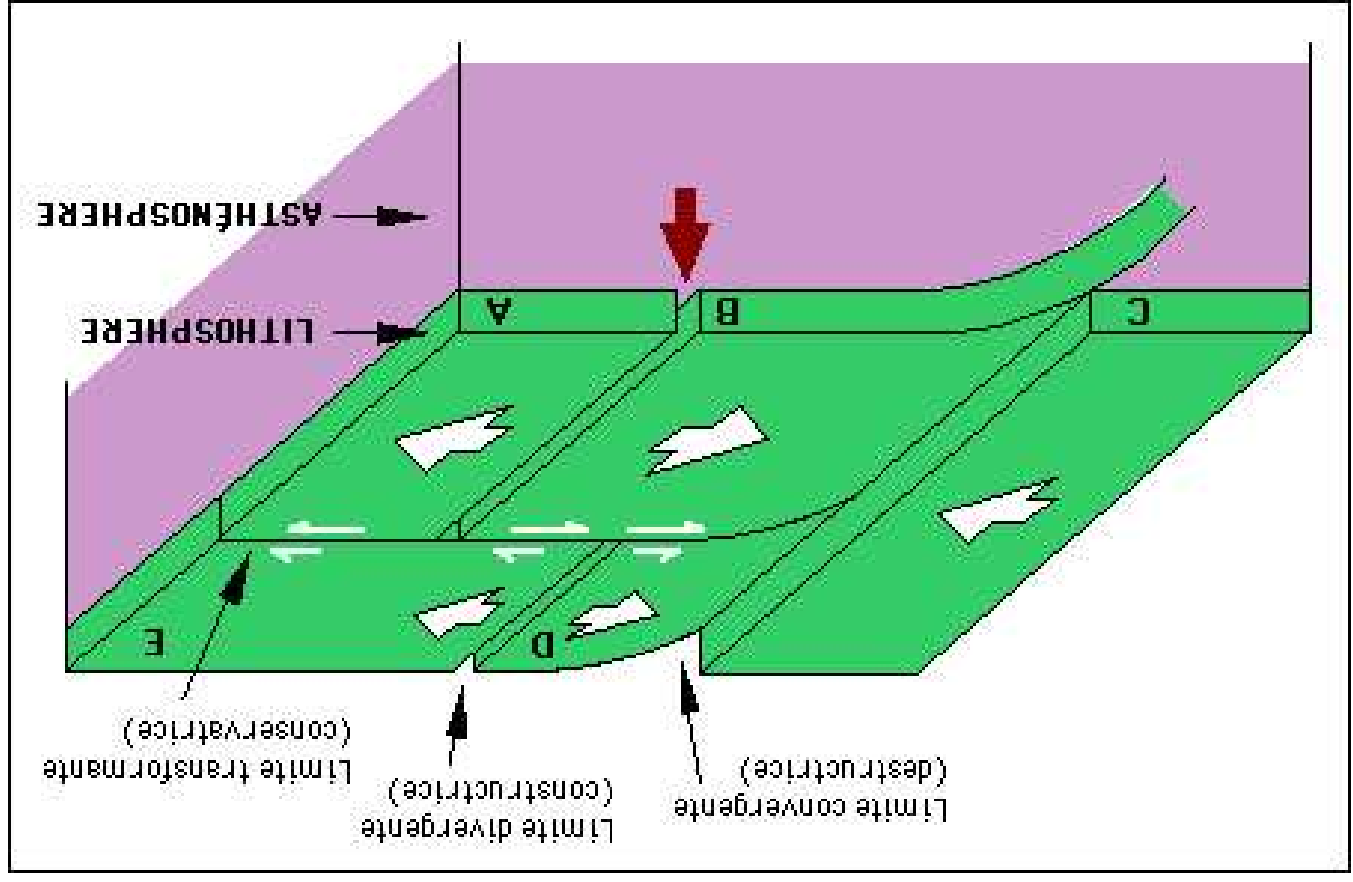


Le globe terrestre est une structure stratifiée...



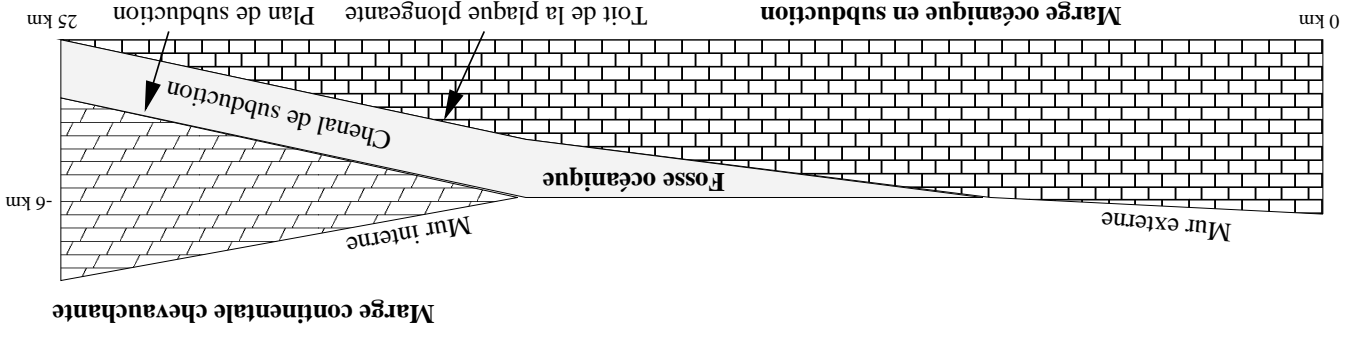


← composée d'une multitude de calottes sphériques : les plaques...



← en mouvement permanent...

← cas particulier d'une subduction de marge océanique sous une marge continentale,



## L'existant vs. notre stratégie de modélisation

↪ L'existant en matière de modélisation : simulations analogiques expérimentales et simulations numériques avec résolution d'EDP par éléments finis. But : satisfaire des *critères de similarité physique*.

Problèmes :

▶ transferts d'échelles et aspects thermiques,

▶ indications à petites échelles sur l'épaississement ou l'amincissement.

Comportement de *milieu*, pas de prise en compte des *individualités*.

↪ modélisation par systèmes dynamiques discrets. La conjonction de règles élémentaires locales engendre des comportements d'ensemble complexes :  
▶ modélisation de la convection par une méthode LGA,  
▶ modélisations en sismologie, en érosion de terrain. . .

← réseau d'automates cellulaires : juxtaposition d'une même règle de transition, selon un mode opératoire synchrone, sur des cellules placées aux sommets d'un graphe simple orienté, connexe et d-régulier,

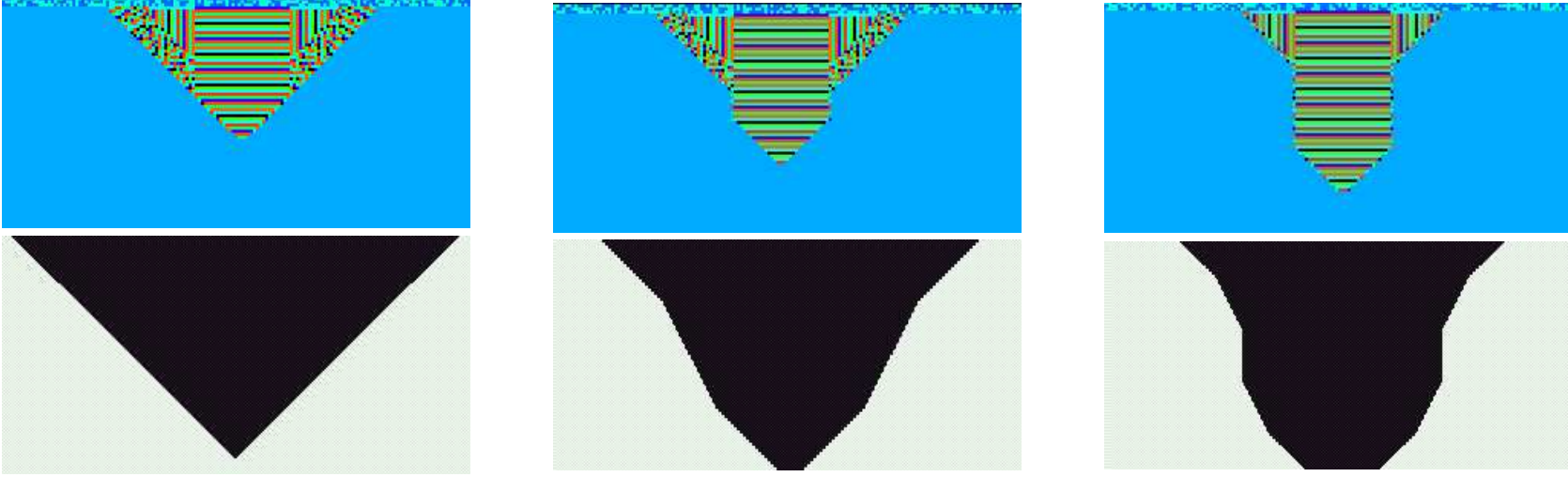
localité  
uniformité  
synchronisation  
parallélisme



## Analogies avec le SPM

- ↪ le *Sand Pile Model* ID :
  - ↪ physique de l'état granulaire (Bak, Tang et Wiesenfeld - 1980),
  - ↪ réseau d'automates cellulaires en ligne,
  - ↪ un automate correspond à une hauteur de pile de sable,
  - ↪ loi de transition :
 
$$\mathbb{I}(n) = \begin{cases} 0 & \text{si } n > 2 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$
 avec :
    - ↪ loi de transition plus complexe à écrire puisque fonction d'un voisinage plus grand (voisinage de Moore étendu),

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



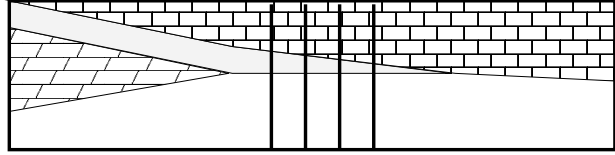
← rendus visuels comparés :

# Les modèles



Automate cellulaire 2D

découpage en blocs de la coupe étudiée



Automate cellulaire 1D

découpage en colonnes de la coupe étudiée

démarche ascendante à base de règles d'interactions locales mutuelles.

### ← modélisation 1D :

▶ ligne finie de 1000 automates cellulaires,
   
 ▶ état d'une cellule : 7 hauteurs de laines,
   
 ▶ état d'une cellule : 6 entiers bornés
   
 correspondant à la "marche", un coefficient de "couche", un coefficient de "vieillesse", la "courbure", la "mémoire" et l'altitude de la cellule

### ← modélisation 2D :

▶ 24 voisins (voisinage de Moore étendu),
   
 ▶ imbrication de trois "moteurs" correspondant à trois échelles de temps,
   
 ▶ mécanisme additionnel pour la transmission d'une donnée globale

(Coeff<sub>Translation</sub>),
   
 ▶ 2 voisins,
   
 ▶ mécanisme de réplication des cellules des bords internes singularisées,
   
 ▶ mécanisme additionnel pour la transmission d'une donnée globale

Représentation de  $(C^t)_{t \in \mathbb{N}}$  par un "jeu de bascule" entre deux tableaux C et CC.

← **algorithme simplifié 1D**

répéter

$CC \leftarrow C$

$C \leftarrow F^{lente}(CC, Coeff_{Tr})$

répéter

$CC \leftarrow C$

$C \leftarrow F^{moyenne}(CC, Coeff_{Tr})$

répéter

$CC \leftarrow C$

$C \leftarrow F^{rapide}(CC)$

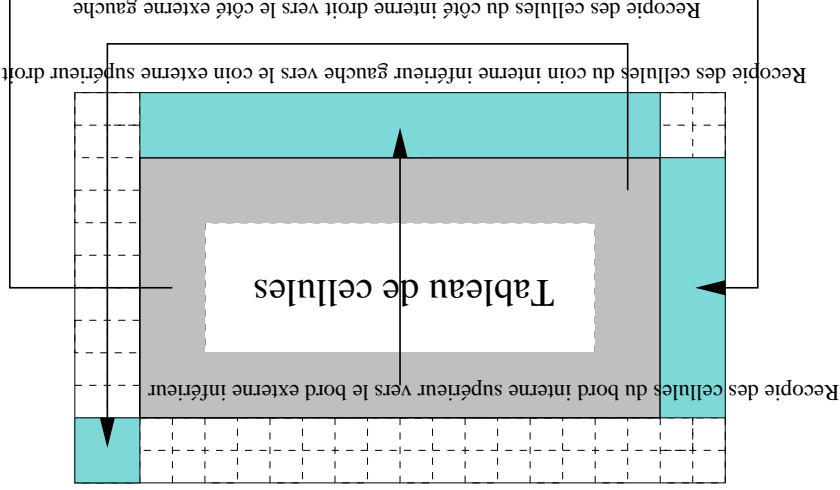
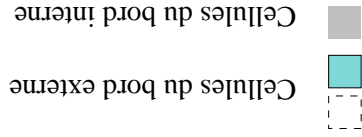
jusqu'à condition d'arrêt 1

jusqu'à condition d'arrêt 2

saisie conditionnelle d'image

jusqu'à condition d'arrêt 3

répéter  
 $CC \leftarrow C$   
 réplification des bords de CC  
 $C \leftarrow F(CC)$   
 jusqu'à condition d'arrêt



← **algorithme simplifié 2D**



← 3 "moteurs" imbriqués du modèle 1D :

(on les retrouve en 2D à l'exception de la translation du front de la marge océanique)

– échelle de temps lente :

subduction et génération des "brises de pente";

d'égradation et érosion de la base de la plaque continentale,

émission ou non du signal  $Coeff_{translation}$ ,

– échelle de temps intermédiaire :

translation éventuelle du front de la marge océanique,

nivèlement de la fosse océanique,

affaissements de terrain au sein de la plaque continentale,

– échelle de temps rapide :

avalanches superficielles sur la plaque continentale.

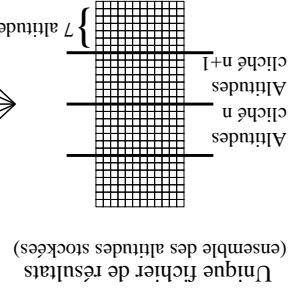
# Les simulations

↳ de la nécessité de développer nos propres outils...

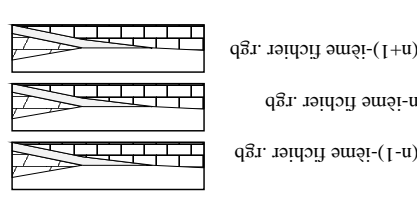
la plate-forme Cellular (= langage Cellang, compilateur cellc, machine virtuelle avcam et viewer cellview) ne correspond pas à nos besoins.

↳ et de bien distinguer les traitements des post-traitements graphiques.

↳ en 1D



Ensemble de fichiers au format RGB  
(issus d'un premier post-traitement)



↳ en 2D

conversion par convert de fichiers SunRaster ou Raw au format GIF, puis assemblage par dmcconvert des images GIF en une animation MPEG-1 vidéo

Raw → GIF → MPV

← stratégie (commune) d'optimisation parallèle :

- ▶ architectures MIMD (asynchrones, distribuées avec bus ou réseau de communication) - modèle par échange de messages
- ▶ méthode de décomposition de domaine

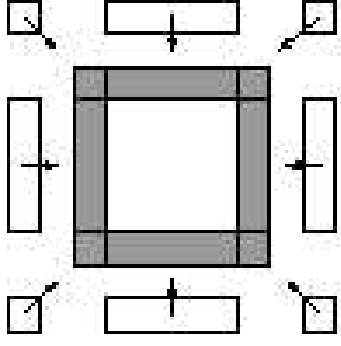
⇒ exploite la localité des données,

⇒ permet une résolution concurrente des sous-problèmes

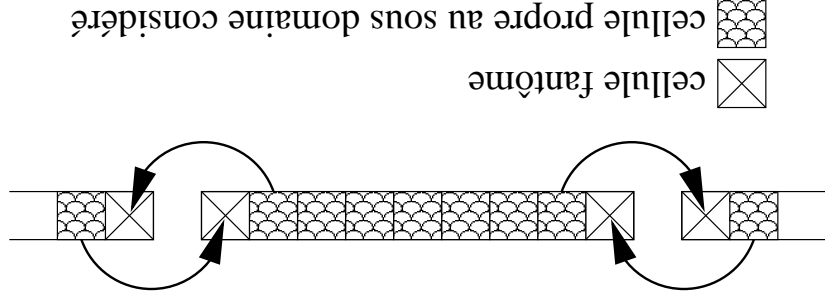
▶ méthode de décomposition de domaine avec recouvrement

⇒ résoudre le problème du stockage en local d'informations non locales...

en 2D



en 1D





← **algorithme simplifié :**

▶ recouvrir les temps de communication par des temps de calcul,  
▶ principes communs aux deux fonctions de transition globales :

1. Envoi non bloquant des bords internes,
2. Mise à jour du sous-domaine (bords internes et externes exclus),
3. Réception bloquante des bords externes,
4. Réévaluation des états des bords internes.

avec quelques sauvegardes périodiques de la configuration du réseau d'automates cellulaires...

## ← gestion des entrées-sorties

désynchronisation d'un processus "superviseur" du reste des "itérateurs".

► Rôle du "superviseur" en ID :

(c'est l'"itérateur" de gid nul)

1. il diffuse les paramètres d'initiali-

sation,

2. il collecte, somme et rediffuse

les valeurs de  $Coeff_{T_{ranslation}}$

(pvm\_reduce, pvm\_bcast),

3. il collecte périodiquement les

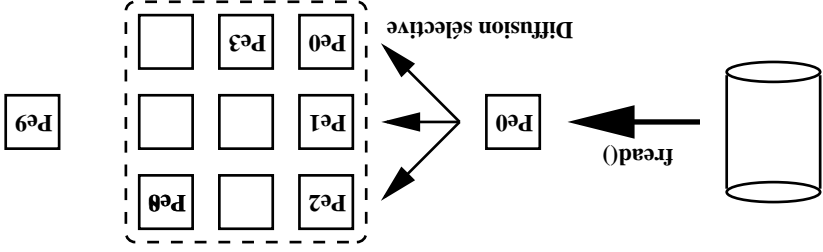
attributs d'altitudes sur les sous-

domaines (pvm\_gather) et les stocke

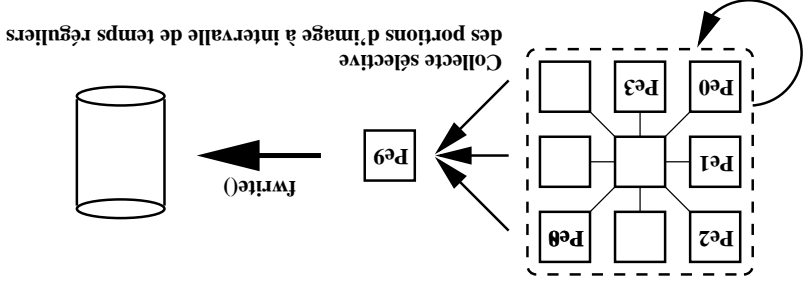
sur disque.

► Rôle du "superviseur" en 2D :

Initialisation - modèle à 10 Pe



Itérations (date t) - modèle à 10 Pe



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

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

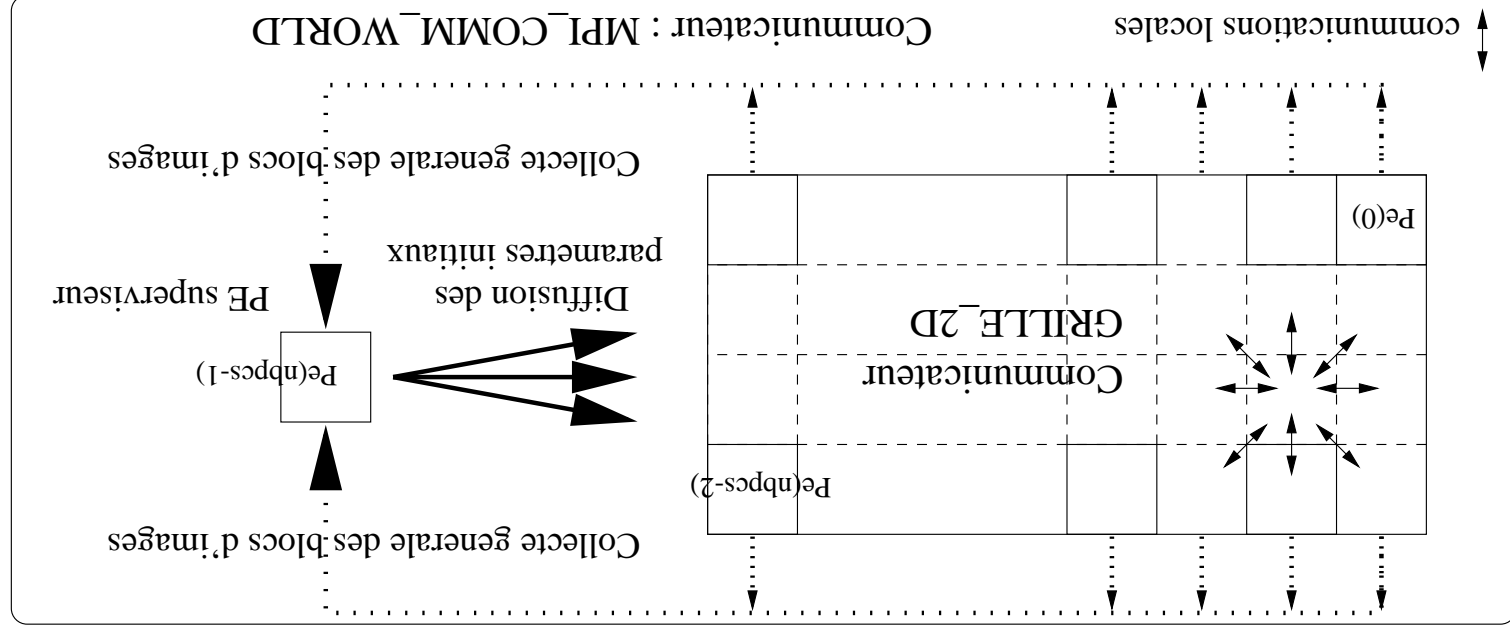
← spécificités de la parallélisation 2D :

de l'intérêt d'utiliser MPI et non plus PVM.

▶ topologie cartésienne de processus :

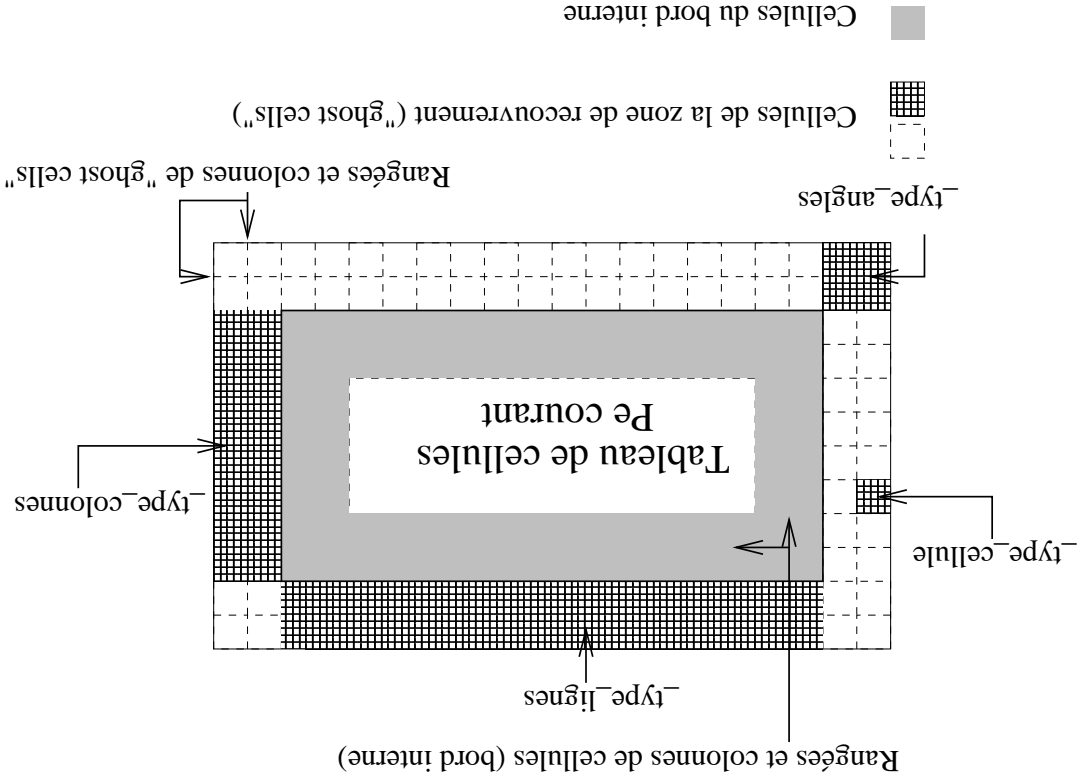
- partitionnement de MPI\_COMM\_WORLD en deux sous-communicateurs,
- les "itérateurs" sont disposés sur une topologie cartésienne virtuelle

régulière à 2D (MPI\_Cart\_create())



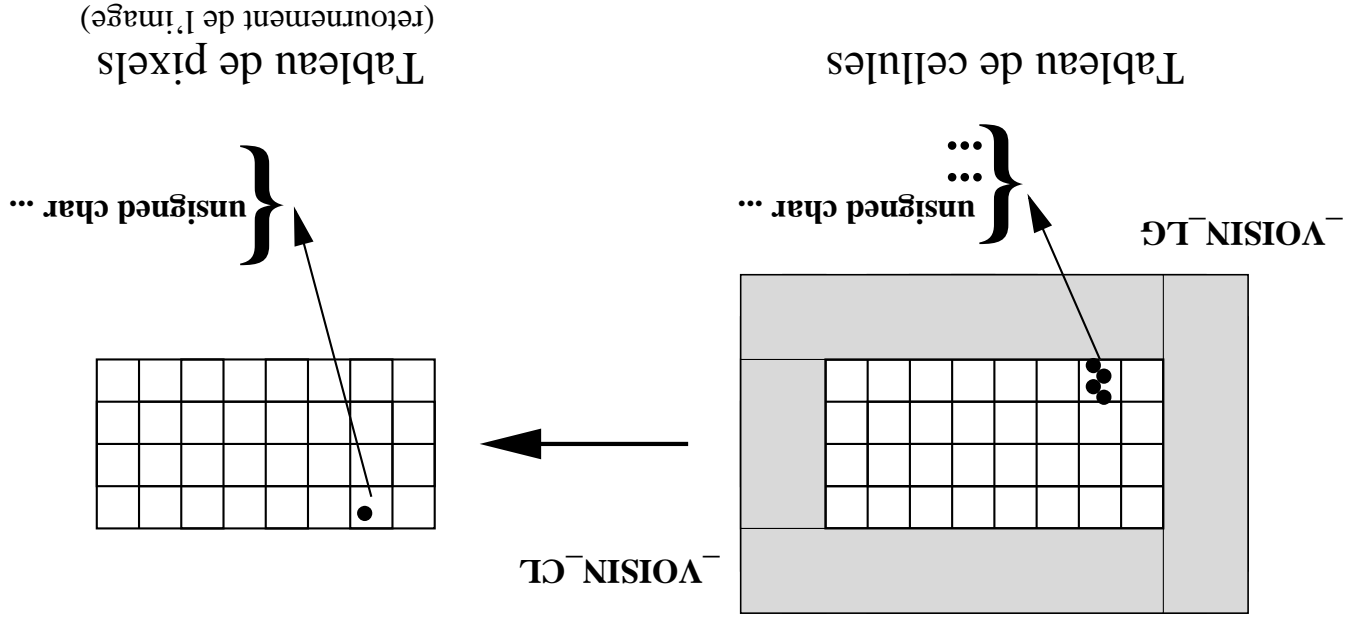
► types de données dérivés :

- le type `-type-cellule` (type hétérogène, `MPI_Type_struct()`),
- les types `-type-lignes`, `-type-angles`, `-type-colonnes` (types de données homogènes vectoriels à pas constant, `MPI_Type_vector()`),



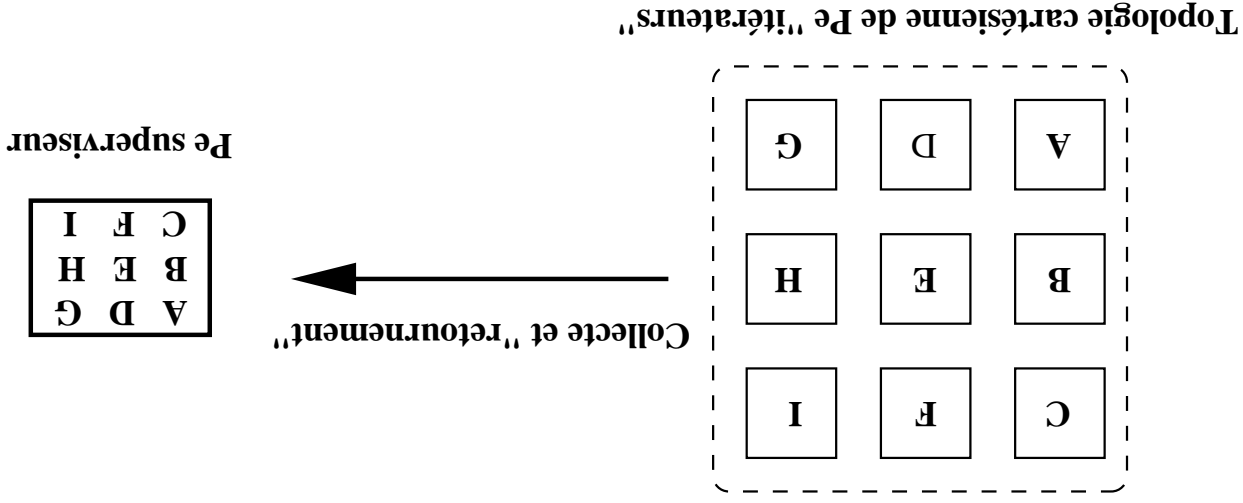
émission des résultats sur les "itérateurs" : il suffit de récupérer la valeur du champ couleur de la configuration courante  
 ⇒ type\_type\_bloc\_image (type homogène à pas variable où le tableau des cellules est considéré comme un tableau d'octets, MPI\_Type\_indexed()) -  
 tailles des champs alignés en mémoire obtenues par MPI\_Type\_extent()),

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



collecte des résultats sur le "superviseur" : `type_image-globale (type homogène à pas constant, primitive MPI_Type_vector())`,

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



## Résultats et performances

► le CRAY T3E :

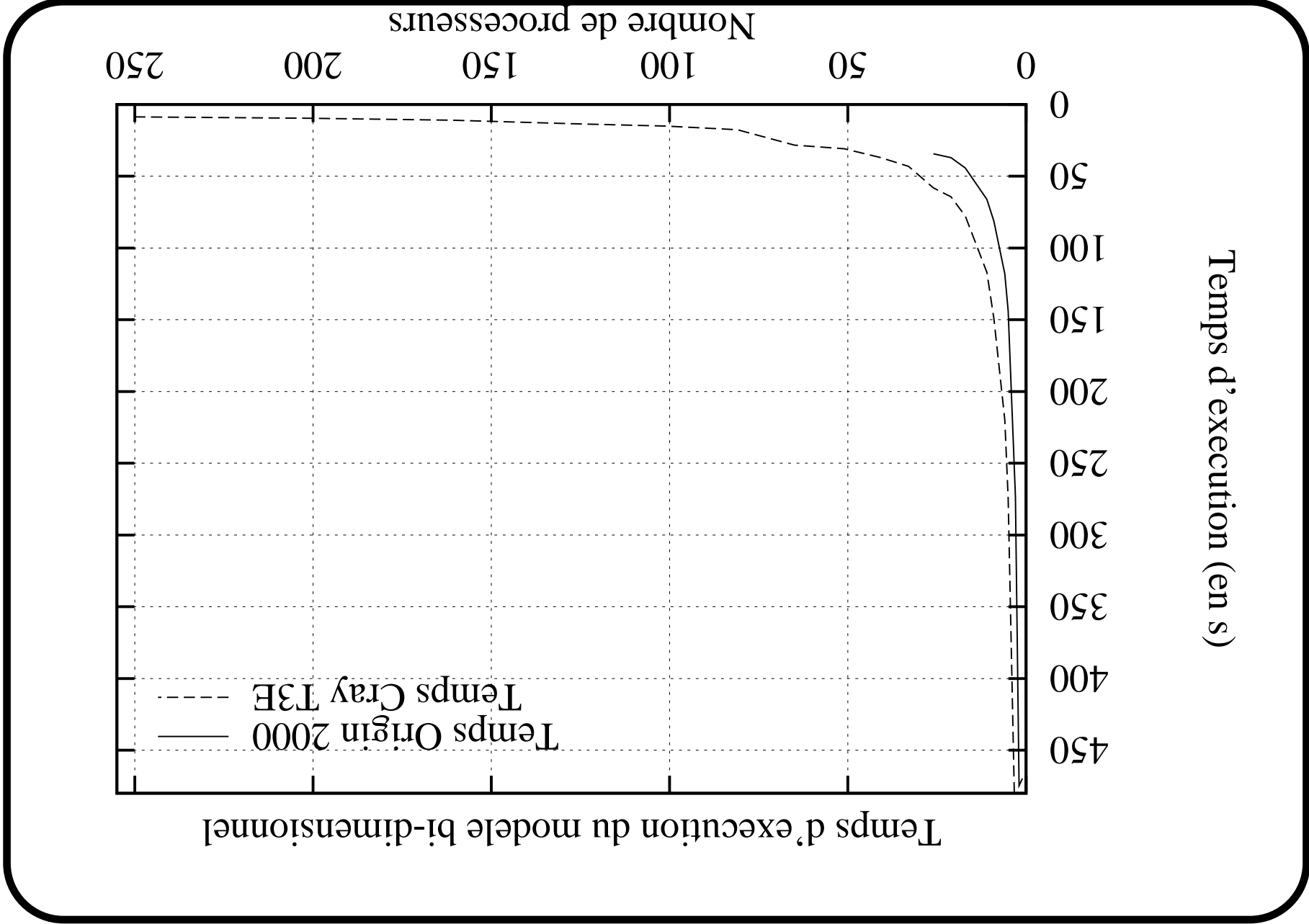


256 Dec Alpha 21164 - 600 Mflop/s,  
caches de données de 8 ko et 96 ko,  
latence : 1  $\mu$ s,  
bande passante : 480 Mo/s,

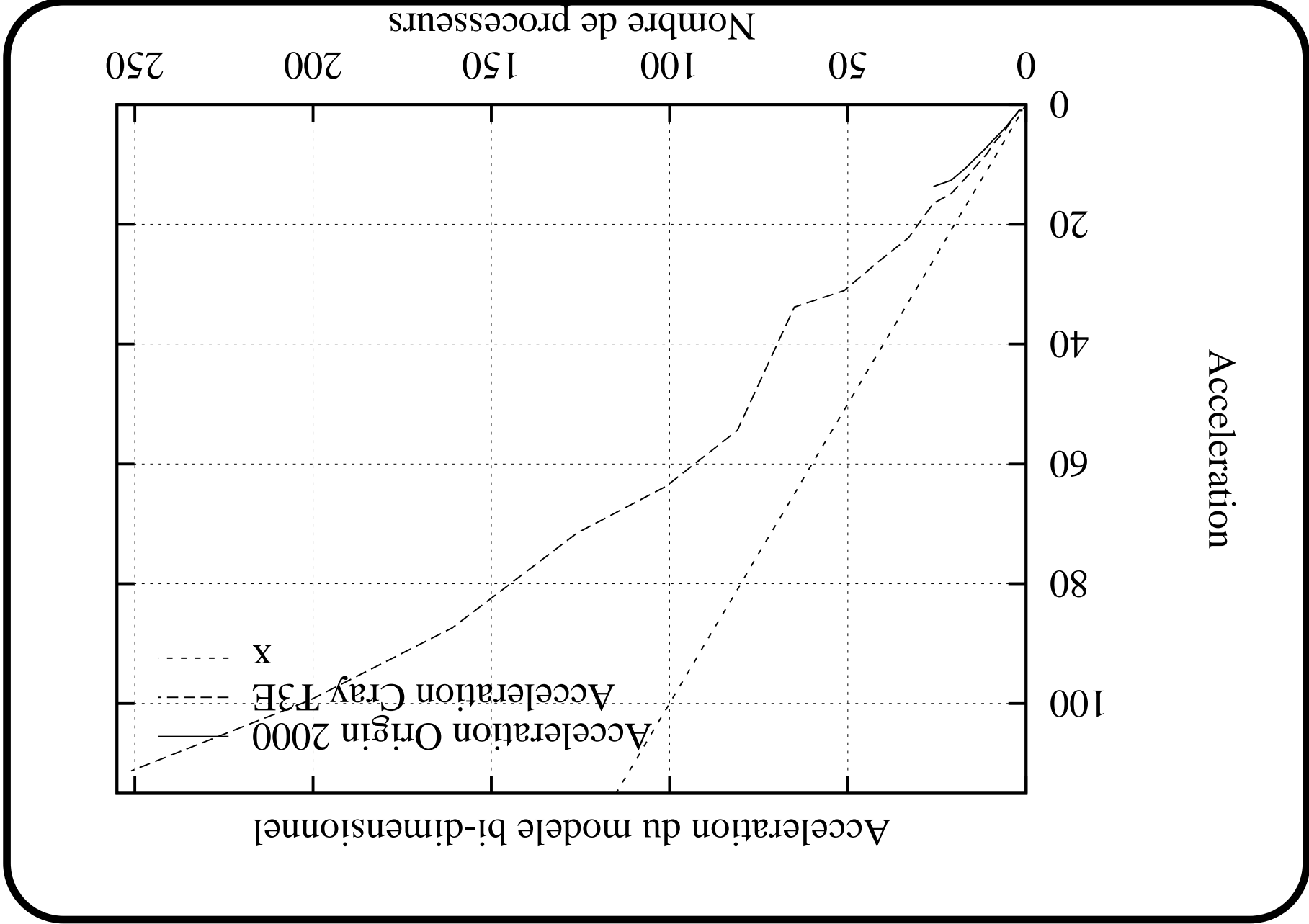
► l'ORIGIN 2000 :

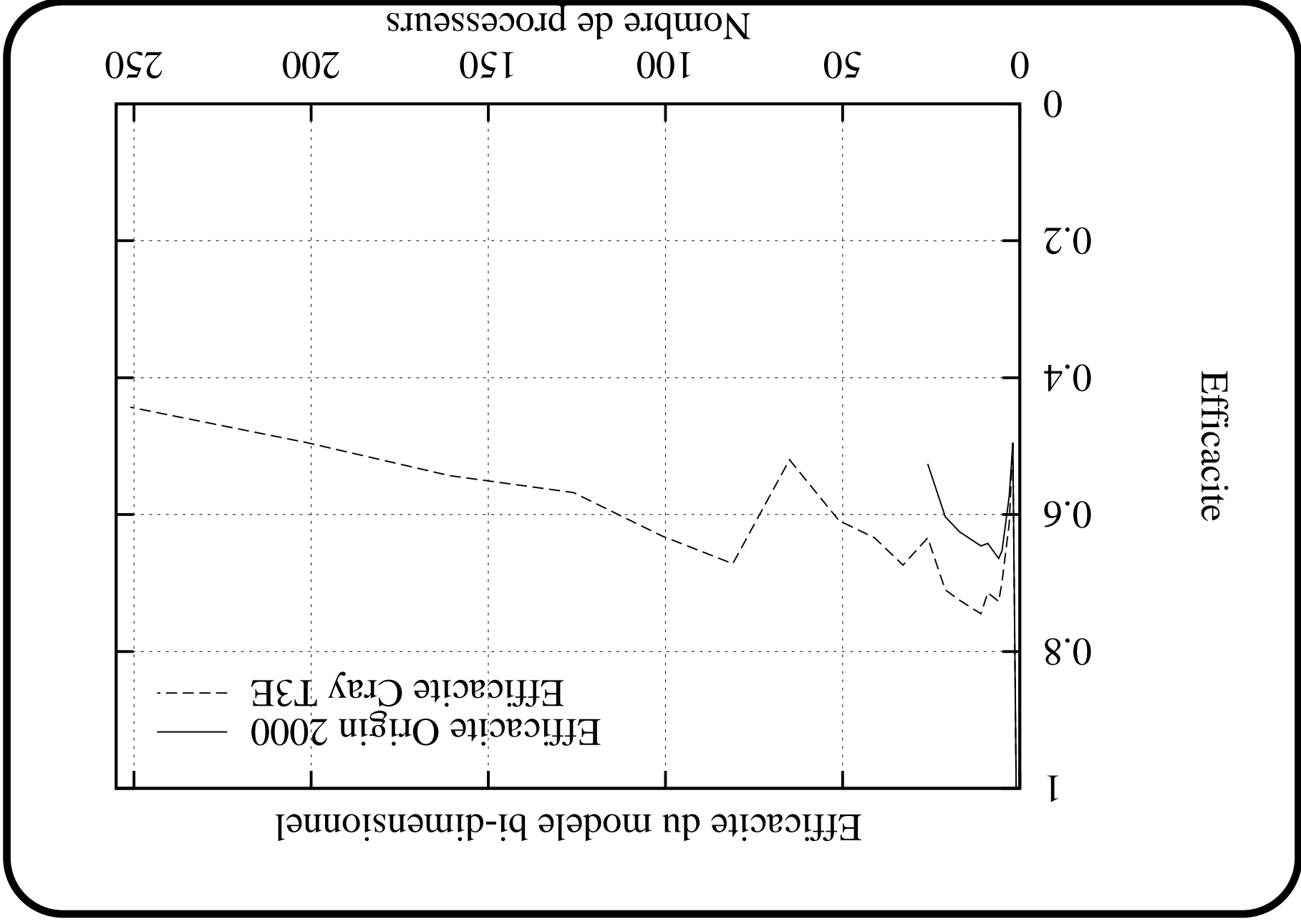


32 R10000 - 390 Mflop/s,  
caches de données de 32 ko et 4 Mo,  
latence : 773 ns,  
bande passante : 780 Mo/s,







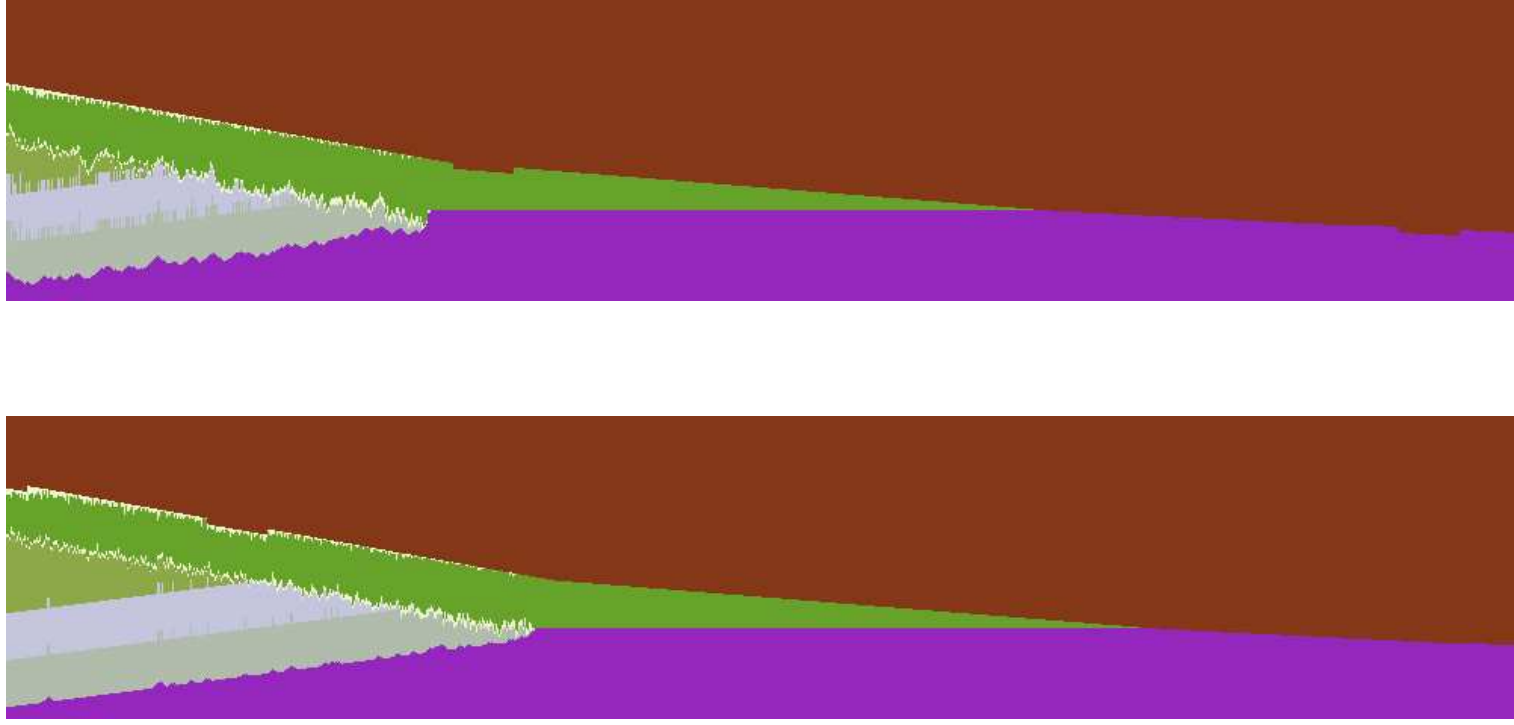


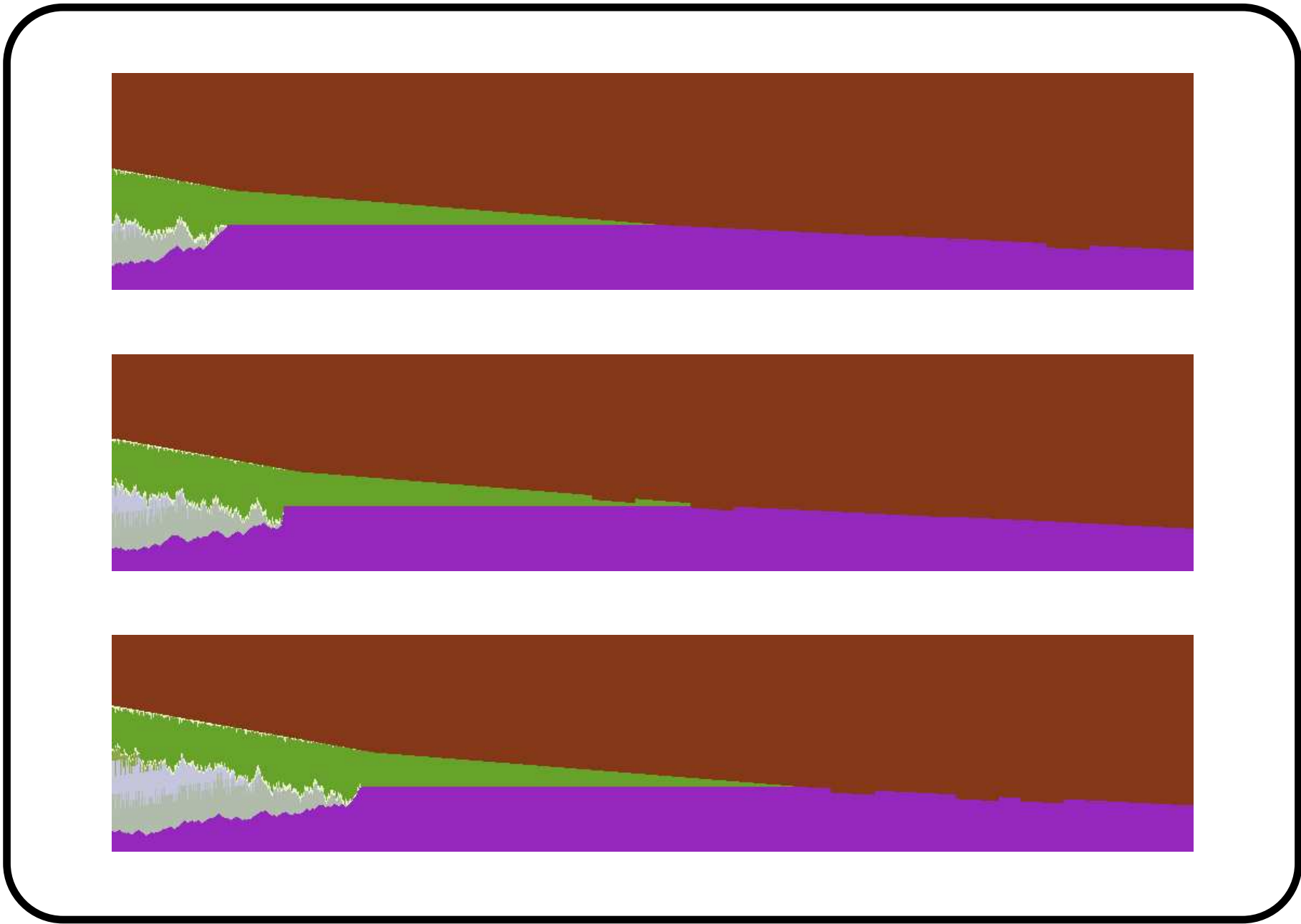


nb proc	Topologies associées (nb de processeurs en ligne * nb de processeurs en colonnes)												Ratios associés (rapport du nb de cellules aux interfaces sur le nb total de cellules d'un sous-domaine)											
40	1*40	2*20	4*10	5*8	8*5	10*4	20*2	40*1	15,48															
50	1*50	2*25	5*10	10*5	25*2	50*1	18,30																	
64	8*8																							
80	2*40	4*20	8*10	10*8	20*4	40*2	17,11																	
100	1*100	2*50	4*25	5*20	10*10	20*5	25*4	50*2	100*1	29,97														
125	5*25	25*5	125*1																					
160	4*40	8*20	20*8	40*4																				
200	1*200	2*100	4*50	5*40	8*25	10*20	20*10	25*8	40*5	21,63	21,63	22,84	22,84	22,84	22,84	22,84	22,84	22,84	22,84	22,84	22,84	22,84		
250	5*50	10*25	25*10	50*5	125*2	250*1	50,98																	

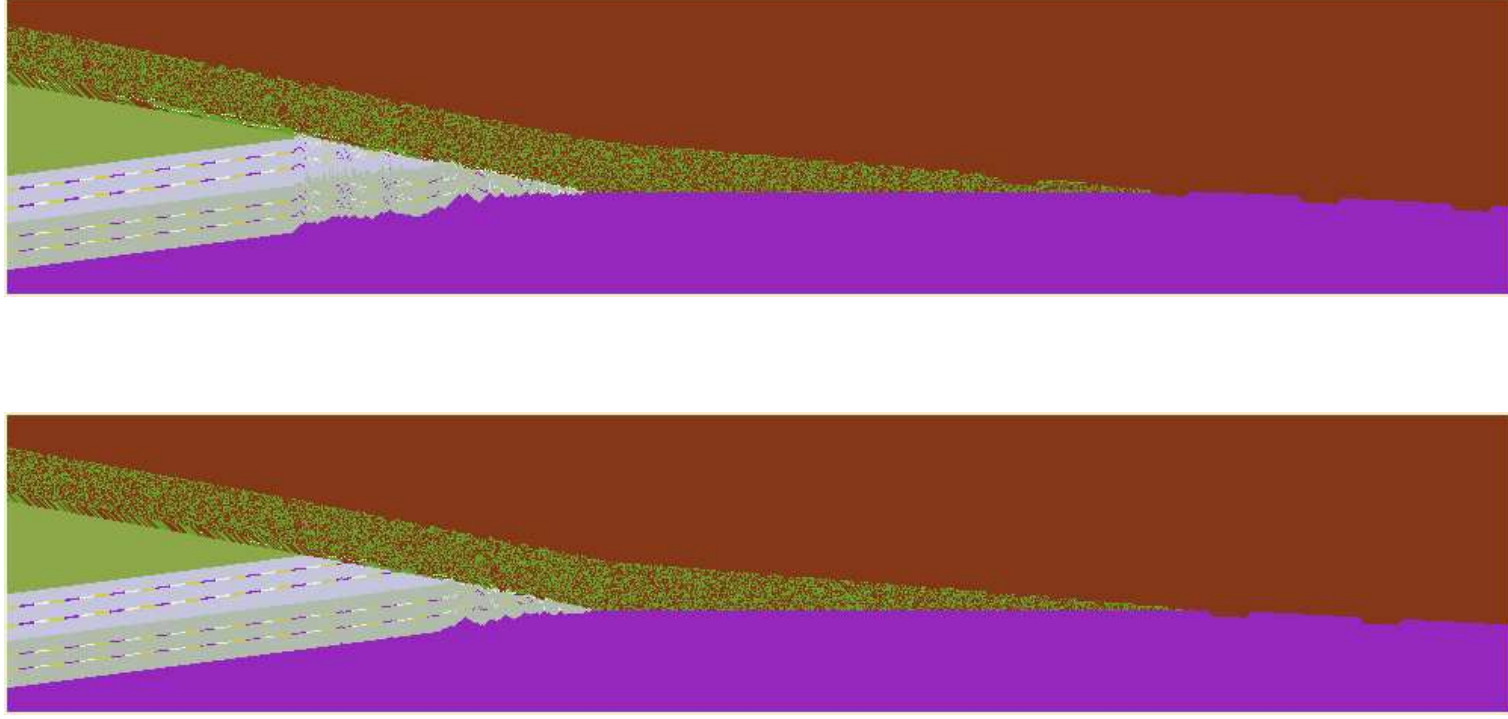


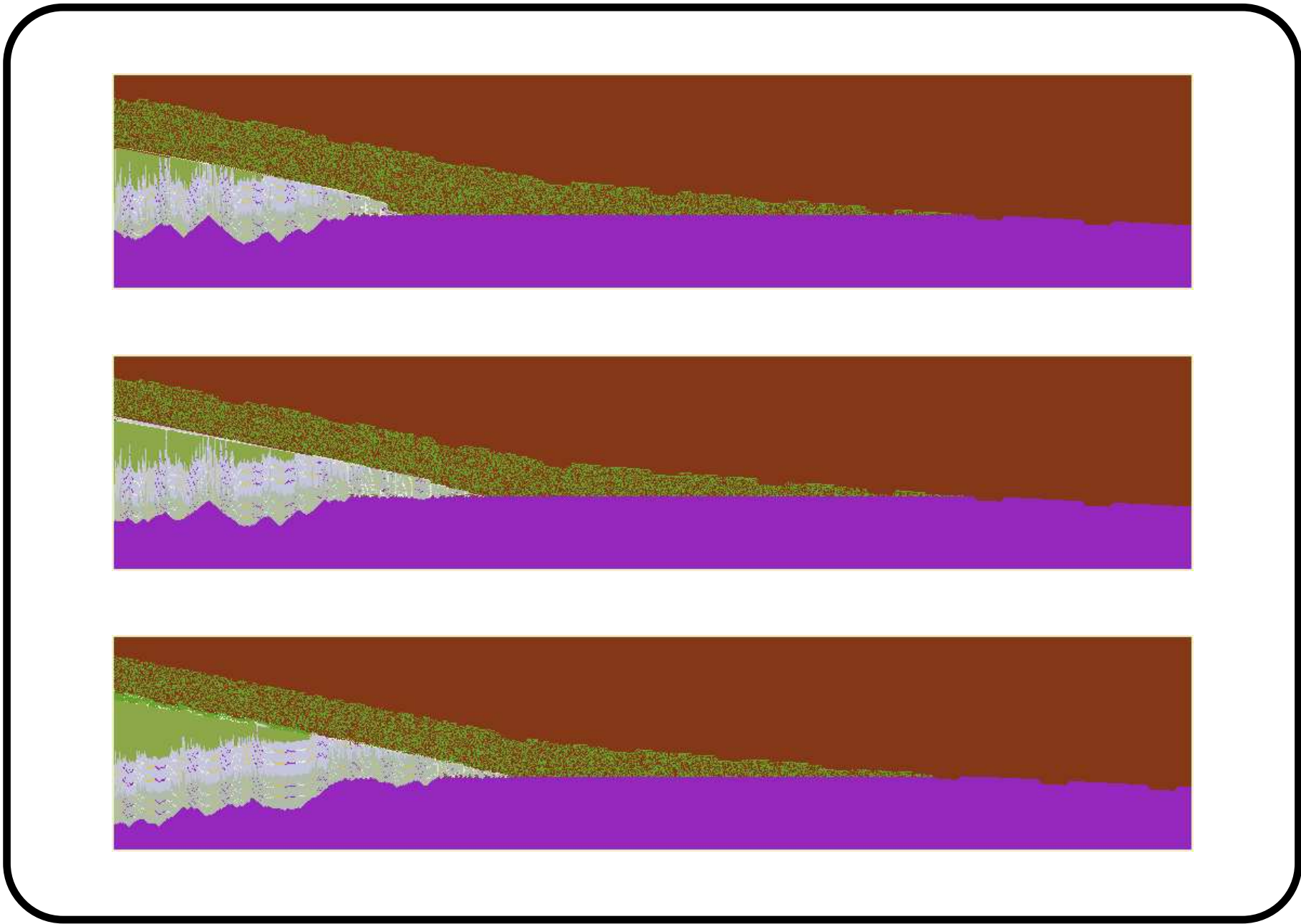
← Copies d'écran de la simulation ID :





← Copies d'écran de la simulation 2D :







← les vertus de l'approche discrète,

← la 1D intermédiaire facilitant le passage à la 2D,

← du bon "rendement" du modèle 1D en terme de rendu-visuel et de la

simulation 2D en terme d'optimisation parallèle,

← justification de l'intérêt des nombreuses fonctionnalités de MPI,

← des simulations à valeur didactique pour l'illustration d'un phénomène

géotectonique.

## Evolutions

← analyser le comportement des simulations,

← plate-forme logicielle spécifique LAC, envisager la 3D...

## Conclusions