

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE
CENTRE D'ETUDES DE LIMEIL-VALENTON
Département de **MATHEMATIQUES APPLIQUEES**
Service Mathématiques et Codes Numériques
94195 VILLENEUVE SAINT GEORGES Cedex

CEA - N-2734 -

CODE DE CIRCULATION OCEANIQUE SUR CONNECTION MACHINE

VITART F

1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une modélisation globale du climat. Le laboratoire qui est le maître d'œuvre de ce projet est le LMCE (Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement) situé à l'Orme des Merisiers. Il s'agit d'un projet défini par la Cellule Environnement du CEA.

Une modélisation globale du climat est réalisée à partir du couplage d'un modèle océan et d'un modèle atmosphère. L'océan a en effet un rôle important dans l'évolution du climat. Il est très directement impliqué dans certains phénomènes climatologiques tels que la mousson ou les oscillations "El Niño" (hausse de la température de l'océan au large du Pérou en hiver, accompagnée de fortes précipitations).

La physique utilisée pour simuler la circulation océanique est beaucoup plus simple que celle utilisée dans la partie atmosphérique, cependant les mouvements dans l'atmosphère ont une amplitude environ dix fois plus grande que ceux dans l'océan. Le modèle océan nécessite donc un maillage beaucoup plus fin que celui utilisé pour l'atmosphère. Sur le plan informatique, c'est donc la partie concernant l'océan qui est la plus coûteuse dans une modélisation globale du climat.

Le code de circulation océanique qui est utilisé au LMCE est le code OPA7 développé au laboratoire LODYC (Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie). Actuellement, la plupart des codes de circulation océanique sont utilisés sur CRAY2, ces codes étant très coûteux en place mémoire. Ces moyens de calcul s'avèrent cependant insuffisants: sur CRAY2 une simulation d'un siècle du code OPA7 sur un maillage 1 degré * 1 degré demanderait 720 heures CPU. Les machines vectorielles ayant plus ou moins atteint leur limite technologique et les machines parallèles connaissant un réel essor, ce sont donc des architectures massivement parallèles que les versions futures du code devront utiliser. Le CEA-DAM ayant la possibilité d'exploiter la CM2 située à l'ETCA et ayant acquis un savoir-faire dans le domaine de la parallélisation, il semblait souhaitable de réaliser une modélisation globale du climat sur machine massivement parallèle en collaboration avec le LMCE.

2 Le Code OPA7

2.1 Les équations

Les équations utilisées sont celles de Navier-Stokes auxquelles quelques simplifications ont été apportées:

-Approximation Quasi-Boussinesq (la densité est uniforme sauf lorsqu'elle est couplée avec la gravité)

-Approximation hydrostatique (les variations temporelles de la vitesse verticale sont négligées).

Les équations sont écrites ici dans un système de coordonnées latitudes-longitudes sans couplage avec l'atmosphère.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + Lu - \frac{uv \tan \phi}{a} - fv &= -\frac{1}{\rho_0 a \cos(\phi)} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ &+ A_m (\nabla^2 u + \frac{(1 - \tan^2(\phi))u}{a^2} - \frac{2 \sin(\phi)}{a^2 \cos^2(\phi)} \frac{\partial v}{\partial \lambda}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + Lv + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + fu &= -\frac{1}{\rho_0 a} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ &+ A_m (\nabla^2 v + \frac{(1 - \tan^2(\phi))v}{a^2} + \frac{2 \sin(\phi)}{a^2 \cos^2(\phi)} \frac{\partial u}{\partial \lambda}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

$$\frac{1}{a \cos(\phi)} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos(\phi)} \frac{\partial}{\partial \phi} (v \cos(\phi)) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + LT = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + A_h \nabla^2 T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + LS = k \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + A_h \nabla^2 S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (7)$$

$$L(\alpha) = \frac{1}{a \cos(\phi)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (u\alpha) + \frac{1}{a \cos(\phi)} \frac{\partial}{\partial \phi} (v\alpha \cos(\phi)) + \frac{\partial}{\partial z} (w\alpha) \quad (8)$$

$$\nabla^2 \alpha = \frac{1}{a^2 \cos^2(\phi)} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos(\phi)} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \phi} \cos(\phi) \right) \quad (9)$$

$$f = 2\Omega \sin(\phi) \quad (10)$$

avec:

u et v composantes horizontales du vecteur vitesse

w composante verticale du vecteur vitesse

U_h vecteur vitesse horizontale

T température

S salinité

p pression

ρ densité

f terme de coriolis

t temps

λ et ϕ latitude et longitude

z coordonnée verticale

A_m coefficient de viscosité

A_h terme de diffusivité de la chaleur et de la salinité

L'équation d'état est donnée par une formule polynomiale de degré 5.

2.2 Conditions Limites

La configuration de l'océan est définie par un champ de profondeur $H(\lambda, \phi)$. Les conditions Est-Ouest sont des conditions périodiques et la topographie représentée correspond à des latitudes variant de 70 degrés Sud à 70 degrés Nord. Les pôles ne sont pas représentés. En effet, au pôle nord, ϕ vaut 90 degrés, ce qui pose des problèmes mathématiques dans l'équation 2.1. Le bassin est fermé: au sud par l'Antartique et au nord par une bande de terre reliant l'Amérique à l'Europe. Les conditions limites nord-sud sont donc les mêmes que celles utilisées pour le traitement des régions côtières: il s'agit de conditions de non glissement (la composante tangentielle de la vitesse est nulle le long d'une côte).

Au fond de l'océan, les flux de vitesse, de salinité et de température sont nuls et:

$$w = -\frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial H}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial H}{\partial \phi} \quad (11)$$

à $z = -H(\lambda, \phi)$

A la surface de l'océan les flux de chaleur ainsi que la vitesse du vent sont donnés à partir des observations atmosphériques. La surface de l'océan est supposée rigide (w supposée nulle à $z=0$), ceci afin d'éliminer les ondes de haute fréquence comme les vagues et donc d'avoir des pas de temps plus grands.

L'initialisation d'un code de circulation océanique est rendue difficile par l'absence de données initiales mesurées. Les seuls champs connus sont la température, la salinité et les contraintes de vents à la surface de l'océan. Notons que ces valeurs correspondent à des moyennes temporelles (sur une période d'environ un mois). Le régime climatique annuel presque stationnaire obtenu en intégrant les équations ci-dessus avec ces champs imposés à la surface et une vitesse initiale nulle est assez proche de la circulation océanique que nous connaissons.

2.3 Résolution du système d'équations

Les équations sont écrites sous la forme:

$$\frac{\partial U_h}{\partial t} + (\text{rot}_z U_h + 2\Omega) * U + w \frac{\partial U_h}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla(p + \frac{1}{2} \rho_0 U_h^2) + F(U) \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(TU_h) + \frac{\partial wt}{\partial z} = G(T) \quad (13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (14)$$

$$\text{div}(U_h) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

$$\rho = \rho(S, T, z) \quad (16)$$

où U_h est le vecteur vitesse horizontale et l'équation 12 peut-être également écrite sous la forme:

$$\frac{\partial U_h}{\partial t} = M(x, y, z, t) - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_s \quad (17)$$

On pose :

$$\overline{U}_h = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 U_h(x, y, z, t) dz \quad (18)$$

et

$$U'_h = U_h - \overline{U}_h \quad (19)$$

D'où:

$$\frac{\partial U'_h}{\partial t} = M(x, y, z, t) - \frac{1}{H} \int_{-H}^0 M(x, y, z, t) dz \quad (20)$$

$$\frac{\partial \overline{U}_h}{\partial t} = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 M(x, y, z, t) dz - \frac{1}{\rho_0} \nabla P_s = G(x, y) - \frac{1}{\rho_0} \nabla P_s \quad (21)$$

La première équation est appelée équation baroclinique, la seconde équation barotrope.

$$\text{div}(\overline{U}_h) = 0 \quad (22)$$

donc

$$\overline{U}_h = \frac{1}{H} \nabla \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (23)$$

d'où l'équation barotrope s'écrit:

$$\text{rot}_z \left(\frac{1}{H} \nabla \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) = \text{rot}_z G \quad (24)$$

avec

$$G = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 M(x, y, z, t) dz \quad (25)$$

A chaque pas de temps, l'équation baroclinique est résolue de manière explicite. Quant à l'équation barotrope, elle est résolue au moyen d'une méthode de gradient conjugué avec préconditionnement diagonal. Ceci permet d'obtenir $\frac{\partial \psi}{\partial t}$. Ce problème est résolu avec des conditions limites de type Dirichlet ($\frac{\partial \psi}{\partial t}$ est une constante sur tous les points d'une île, cette constante variant en fonction du temps et d'une île à une autre).

Une fois la fonction de courant calculée, la composante barotrope de la vitesse est connue, ce qui permet de calculer la vitesse horizontale (somme

de la vitesse barotopique et de la vitesse baroclinique). La composante verticale de la vitesse est alors obtenue à partir de l'équation 2.4.

La température et la salinité peuvent alors être calculées à partir des équations 2.4 et 2.5. La densité se déduit alors de l'équation d'état.

La méthode numérique obtenue pour résoudre ce système est une méthode aux différences finies. Le maillage utilisé est un maillage latitude-longitude. Les variables ne sont pas toutes calculées aux points du maillage. La disposition "type C" définie par Arakawa [2] est utilisée: la fonction de courant est calculée au centre de la maille, la vitesse aux bras du maillage, cependant la température, le salinité et la pression sont définis aux nœuds du maillage.

Le schéma en espace utilisé est du second ordre centré. Le schéma en temps est un schéma de type saute-mouton:

Si le système est mis sous la forme:

$$\frac{Du}{Dt} = f(u) \quad (26)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = f(v) \quad (27)$$

$$\frac{DT}{Dt} = f(T) \quad (28)$$

$$(29)$$

Ce schéma s'écrit:

$$u^{n+1} = u^{n-1} + 2\Delta t f(u^n) \quad (30)$$

$$v^{n+1} = v^{n-1} + 2\Delta t f(v^n) \quad (31)$$

$$T^{n+1} = T^{n-1} + 2\Delta t f(T^n) \quad (32)$$

$$(33)$$

Ceci introduit cependant une divergence entre les solutions correspondant à des pas de temps pairs et celles correspondant à des pas de temps impairs. Afin de palier cet inconvénient, un filtre de Asselin[6] est appliqué à la fin de chaque pas de temps.

Ce filtre est défini par:

$$u_c^n = u^n + \gamma(u_c^{n-1} - 2u^n + u^{n+1}) \quad (34)$$

$$v_c^n = v^n + \gamma(v_c^{n-1} - 2v^n + v^{n+1}) \quad (35)$$

$$T_c^n = T^n + \gamma(T_c^{n-1} - 2T^n + T^{n+1}) \quad (36)$$

avec γ compris entre 0 et 1

2.4 Parallélisation du code sur CM2

La CM2 est une machine SIMD (Single Instruction Multiple Data), comportant de 8K à 64K processeurs élémentaires (1 bit). S'agissant d'une machine SIMD, les processeurs effectuent tous la même instruction ou ne font rien. Le langage utilisé est le CMFortran.

La parallélisation de ce code sur CM2 a posé peu de problèmes dans la mesure où le schéma numérique utilisé est un schéma aux différences finies explicite. Une première phase a donc consisté à réécrire le code en CMFortran (suppression des boucles, remplacement de IF par la commande WHERE qui permet de faire une opération sur certains processeurs seulement ...).

Dans la version CRAY2, certaines procédures utilisent l'adressage indirect, c'est le cas de la partie résolution de l'équation barotrope. En effet, l'adressage indirect permet de ne résoudre cette équation qu'aux points océan, ce qui évite des calculs inutiles. La version CM2 n'utilise pas d'adressage indirect et fait donc le même nombre d'opérations en tout point du maillage, elle utilise un masque afin de différencier les points océan et les points situés sur un continent ou une île.

Certaines procédures comme celle réalisant l'ajustement convectif ont dû être totalement réécrites, les calculs variant d'un point à un autre.

Le traitement des conditions limites EST-OUEST périodiques n'est pas identique sur la version CRAY et sur la version CM2. En effet la CM2 ayant la structure d'un hypercube, ces conditions limites périodiques sont traitées automatiquement:


```
Do 10 i=1,n  
A(i) = B(i+1)  
10 Continue
```

s'écrit en CMFortran :
A = CSHIFT(B,1,+1)
et contient la condition limite:
A(n) = B(1)

Sur Cray le traitement de ces conditions limites périodiques nécessite l'utilisation de deux colonnes supplémentaires, dans lesquelles sont dupliquées les valeurs contenues dans les deux premières colonnes. De ce point de vue, la version CM permet d'éviter des calculs inutiles.

2.5 Structure des données sur CM2:

Le problème traité est tridimensionnel et les composantes horizontales des tableaux sont placées en parallèle alors que toute la verticale en un point est située sur un même processeur.

Le tableau MBATHY permet de repérer les îles, les continents et les points océans: MBATHY vaut 0 sur les points continents, -N sur la Nième île et M sur un point océan où M est le niveau de profondeur en ce point.

2.6 Cas tests

Afin de valider le code sur CM2, deux cas test ont été étudiés: le premier concerne un bassin à fond plat, le second une topographie terrestre avec huit îles.

2.6.1 Bassin à fond plat

Le cas test consiste en un bassin discrétisé en 128*128*20 à fond plat. Les conditions limites latérales sont des conditions limites absorbantes et donc non périodiques. Ce cas test a été passé sur CRAY et sur Connection Machine. Les temps de calcul obtenus ont été placés dans le tableau ci-dessous:

	CRAY 2 1 proc	CRAY YMP 1 proc	CM2 8K	CM2 16K	CM200 16K
Temps en μs par maille et par itération	7.06	4.05	4.81	2.44	1.12
MFlops	112	197	163	321	708

Sur ce cas test, le nombre d'opérations est le même dans la version Cray et dans la version CM de ce code de circulation océanique. La comparaison des performances MFlops a donc un sens. De ces résultats, nous tirons les conclusions suivantes:

-Le CRAY YMP permet de gagner un facteur 1.5 par rapport au CRAY 2 monoprocesseur.

-Le passage de 8K processeurs à 16K processeurs sur CM2 permet de gagner un facteur 2.

- Les performances sur CM200 16K processeurs indiquent un gain d'un facteur 2 par rapport à la CM2 16K processeurs. d'une part parce que la fréquence d'horloge des processeurs sur CM200 est plus élevée que sur CM2, d'autre part parce que le mode de compilation utilisé sur CM200 est Slicewise au lieu de Paris sur CM2[7].

- Sur CM200 16K processeurs, les calculs sont donc effectués 7 fois plus vite que sur CRAY2 1 processeur. En extrapolant sur CM200 64K, la vitesse de calcul devrait donc être de l'ordre de 2.8 Gigaflops. Cependant les calculs sur CM2 ont été effectués sur 32 bits au lieu de 64 bits sur CRAY.

Le tableau suivant représente les résultats obtenus sur CM5 sans nœuds vectoriels:

	CM5 32N	CM5 64N	CM5 128N	CM5 256N	CM5 512N
Temps en μ s par maille et par itération	14.9	8.08	5.44	3.28	1.48
MFlops	53	97.6	145	240	531

Ces résultats indiquent une performance d'environ 1 MFlops par nœud. La progression n'est pas linéaire, en effet les communications entre processeurs (en particulier les CSHIFT) s'avèrent coûteuses, le compilateur CM-FORTRAN existant actuellement sur CM5 n'ayant pas été optimisé pour l'architecture "fat tree" de la CM5.

Les premiers temps de calcul obtenus en utilisant la CM5 avec nœuds vectoriels mettent en relief la lenteur des communications entre processeurs évoquée ci-dessus. En effet avec un maillage $256*128*30$, l'utilisation de 64 nœuds vectoriels au lieu de 32 ne permet de gagner qu'un facteur 1.5 au lieu de 2 théorique. Plus la taille du domaine est grande plus les performances en MFlops sont importantes: les nœuds effectuent plus de calculs et par conséquent la proportion de calculs par rapport aux communications a tendance à augmenter.

maillage	CM5 32N 256*128*30	CM5 64N 512*256*30
Temps en μ s par maille et par itération	2.95	1.19
MFlops	260	660

2.6.2 Topographie terrestre

Le deuxième cas test est constitué par une topographie terrestre avec huit îles (Antarctique, Ceylan, Corse-Sardaigne, Australie, Nouvelle-Zélande, Cuba, Madagascar et Taiwan). Le maillage utilisé est un maillage 256*128 avec 33 niveaux de profondeur. La profondeur étant variable, les nombres d'opérations sur Cray et sur CM ne sont plus les mêmes.

Le tableau suivant indique le temps d'exécution en micro-seconde par maille et par itération. Les nombres affichés ci-dessous représentent le temps par maille et par itération.

	CRAY YMP 1p	CRAY YMP 2p	CM2 8K	CM200 16K	CM5 256N
32 bits			3.96	1.30	1.78
64 bits	3.45	1.71		1.98	2.53

Ces résultats indiquent des performances voisines entre une CM200 16K processeurs et un CRAY YMP 2 processeurs sur 64 bits. Une CM5 256 nœuds ayant des nœuds composés uniquement de Sparc ne permet donc pas d'obtenir des performances supérieures à une CM200 16K processeurs.

Sur CRAY YMP 1 processeur, la performance obtenue est d'environ 200 MFlops. Les nombres d'opérations effectuées sur le CRAY et sur la Connection Machine ne sont pas les mêmes, en effet sur le CRAY les équations barotropiques sont résolues uniquement sur la partie océan, alors que sur Connection Machine elles le sont sur l'ensemble des points; les calculs n'étant valables que sur les points océans, les processeurs représentant des points continents ou îles sont alors masqués, c'est-à-dire qu'ils n'effectuent aucune opération pendant que les autres processeurs sont actifs. Cette méthode permet d'éviter le recours à l'adressage indirect qui était utilisé dans la version CRAY.

2.7 Etudes en cours

Les études actuellement en cours visent à améliorer ce code de circulation océanique, elles s'orientent vers les objectifs suivants:

- Utiliser une nouvelle équation d'état
- Utiliser une formulation pression de surface
- Utiliser un nouveau maillage

2.7.1 Equation d'état

Les équations d'état utilisées dans OPA7 utilisent des formules polynomiales d'ordre 5 dites "UNESCO" [3]. Le domaine de validité de ces équations est très large:

- Pression allant de 1 à 1000 bars
- Température variant de 0 à 40 degrés Celsius
- Salinité comprise entre 0 et 42 grammes par litre

Cette partie du programme représente 20 % du temps total et correspond à un domaine de validité excessivement large. Afin de diminuer ce temps de calcul, des formules simplifiées peuvent être utilisées. Ainsi au GFDL [4], les formules utilisées sont des formules polynomiales plus simples avec un domaine de validité plus restreint et variant suivant le niveau sur la verticale.

2.7.2 Formulation Pression de Surface

Cette formulation a été mise au point au Los Alamos National Laboratory par Rick Smith et John Duckowicz [5]. Le problème posé par la formulation pression de surface vient des conditions limites qui sont de type Dirichlet. En conséquence, la dérivée temporelle de la fonction de courant est constante sur le contour de chaque île, mais varie en fonction du temps et d'une île à une autre. Elle est prise arbitrairement égale à zéro sur le continent. Afin d'en connaître la valeur, une intégration autour de l'île est nécessaire. Ceci s'avère coûteux sur la Connection Machine car pour effectuer cette intégration, il est nécessaire de faire une somme globale sur tous les points du maillages (donc sur tous les processeurs) en masquant ceux qui ne représentent pas un point

de la côte d'une île considérée. Cette opération est très coûteuse sur CM. Ainsi plus le nombre d'îles devient important, plus le temps dépensé dans le traitement de ces conditions limites devient grand.

Un moyen d'éviter cela consiste à résoudre les équations de mouvement non pas en utilisant la fonction de courant comme variable, mais plutôt la pression de surface. Les conditions limites deviennent alors des conditions de Neuman et elles sont implicitement contenues dans le fait que sur les îles $H = 0$ (H désigne la profondeur). Les îles peuvent être traitées toutes en même temps, et le traitement des conditions limites ne dépend plus de leur nombre. Un autre avantage de cette méthode est que l'opérateur n'est plus sensible aux variations rapides de topographie du fond de l'océan (avec la formulation pression de surface, il est nécessaire de lisser le fond de l'océan afin d'éviter des variations trop brusques). Les résultats obtenus avec cette méthode sont identiques à ceux obtenus en utilisant la fonction de courant comme variable.

2.7.3 Nouveau maillage

Le maillage utilisé actuellement n'est pas très satisfaisant. En effet il correspond à des latitudes variant d'environ 60 degrés Sud à 60 degrés Nord. Les pôles ne sont donc pas représentés dans ce maillage. En ce qui concerne le pôle Sud, ce n'est pas un problème car il s'agit d'un continent, par contre le pôle Nord a un rôle assez important dans la circulation océanique. Afin de palier ce problème, Olivier Marti (LMCE) a mis au point un maillage déformé mais respectant les conditions d'orthogonalité, tel que le pôle nord de ce maillage soit situé sur un continent (par exemple sur la Sibérie).

Les continents et les îles représentent environ un tiers de la superficie du globe. Dans le cadre de la programmation SIMD, les calculs sont effectués en même temps sur tous les points du maillage, ceux correspondant aux îles ou aux continents étant masqués. Ainsi un tiers des processeurs sont inutilisés. De plus certaines zones océaniques ont besoin d'être maillées plus finement que d'autres (par exemple les parties Ouest des océans).

L'utilisation de maillages non structurés ou de maillages multiblocs peut permettre de résoudre ce problème. En effet, certaines zones peuvent ainsi être maillées plus finement. Cependant l'utilisation de maillages non structurés se révèle coûteuse sur CM2. Une étude a ainsi été entreprise afin d'évaluer le coût de maillages multiblocs sur CM2.

3 Etude de l'utilisation de domaines multiblocs sur CM2

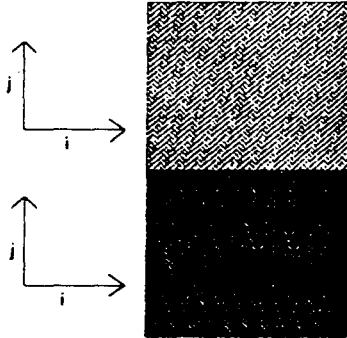
Cette étude consiste à évaluer les pertes de temps dues aux communications entre les blocs lorsqu'on utilise une géométrie multiblocs. La stratégie employée ici a consisté à ce que deux blocs adjacents aient une ligne ou une colonne en commun. Les calculs sur cette rangée commune sont effectués de part et d'autre de chaque bloc et la condition limite à cette frontière consistera donc à sommer les valeurs obtenues en chacun des blocs. Le temps dépensé lors de cette opération a été désigné sous le nom "Temps de communication" dans les tableaux figurant ci-dessous. Tous les calculs ont été réalisés sur une CM2 en utilisant 8K processeurs.

Deux séries de problèmes ont été étudiées:

3.1 Tests d'advection

L'advection étant présente dans un grand nombre des problèmes physiques, ce test nous a semblé intéressant. Elle est effectuée à l'aide d'une méthode de remapping très simple du premier ordre. On dispose d'un ou de plusieurs blocs et au départ la densité est nulle partout sauf dans une surface carrée et cette distribution est transportée d'un bloc à un autre. Ce test a été effectué sur plusieurs types de géométries:

a) 2 blocs 128*128

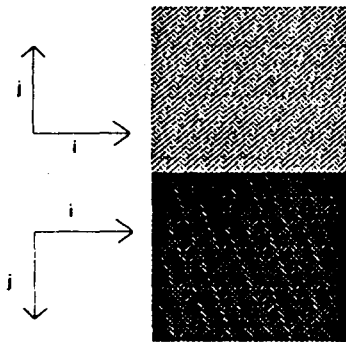


Temps total pour 200 itérations: 8.51s

Temps de communication : 0.16s

b) On permute l'orientation j dans le repère i, j du bloc du bas

Ainsi la condition limite consiste à connaître la valeur du champ de densité sur la première ligne de chacun des blocs. Elle se réduit dans ce cas là à simplement additionner les valeurs calculées sur la première ligne du bloc 1 avec celles de la première ligne du bloc 2.



Temps total pour 200 itérations: 8.38s

temps de communication : 0.039s

c) On dispose d'un seul bloc 128*256

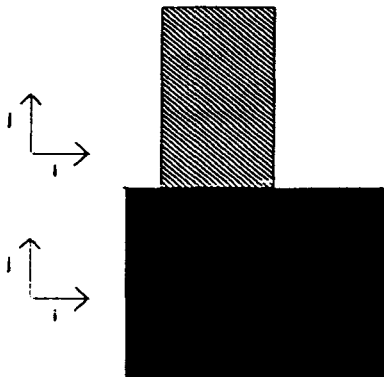
Temps total: 8.26s

Le temps de calcul effectué à l'intérieur des blocs est plus important lorsque la géométrie est morcelée en plusieurs blocs que lorsqu'il n'y a qu'un seul bloc car dans ce dernier cas le VP ratio (rapport du nombre de processeurs virtuels sur le nombre de processeurs physiques) est plus élevé.

3.2 Tests biblocs

La deuxième géométrie utilisée est composée de deux blocs, un 128*128 et l'autre 64*128 décalé de 10 par rapport au premier bloc (le point 1,1 du deuxième bloc coïncide avec le point 11,128 du premier si l'orientation i,j est la même dans les deux blocs)

a) L'orientation des vecteurs \vec{i}, \vec{j} est la même.

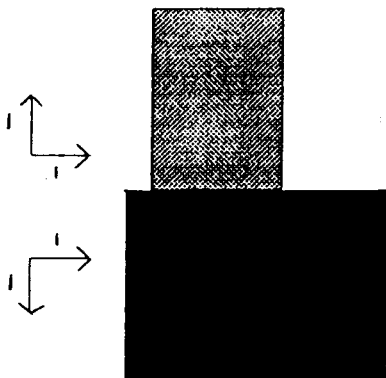


Temps total pour 200 itérations: 9.36s

Temps de communication : 1.79s

b) On permute l'orientation de j dans le premier bloc

Ainsi la condition limite entre les deux blocs consiste en la somme de la première ligne de chacun des blocs.



Temps total pour 200 itérations: 9.32s

Temps de communication : 1.76s

Si le temps de communication est encore long et n'a pas été tellement amélioré c'est dû au fait que les deux blocs n'ont pas la même taille et qu'il y a un léger décalage dans le direction horizontale.

c) Utilisation de Align

Même convention qu'en 2.1, mais on utilise la commande CM-FORTRAN ALIGN qui permet de placer sur les mêmes processeurs l'élément $i,1$ du bloc 2 avec l'élément $i+10,1$ du bloc 1. Ainsi la condition limite entre les deux blocs se limitera à une somme de termes placés sur des processeurs voisins (dans ce cas on doit sommer $\text{bloc2}(i,1)$ avec $\text{bloc1}(i+10,128)$, mais $\text{bloc2}(i,1)$ étant sur le même processeur que $\text{bloc1}(i+10,1)$, $\text{bloc2}(i,128)$ et $\text{bloc1}(i+10,1)$ sont placés sur des processeurs voisins).

Temps total pour 200 itérations : 10.69s

Temps de communication : 0.1790s

d) Utilisation de Align avec permutation des indices

Même convention qu'en 2.2, mais on utilise la commande CM-FORTRAN ALIGN qui permet de placer sur les mêmes processeurs l'élément $i,1$ du bloc 2 avec l'élément $i+10,1$ du bloc 1. Ainsi la condition limite entre les deux blocs se limitera à une somme de termes placés sur mêmes processeurs .

Temps total pour 200 itérations : 10.50s

Temps de communication : 0.0516s

La commande ALIGN permet certes d'économiser le temps perdu à cause du transfert d'information entre les blocs, mais le temps total de calcul est plus long, car cette manière de disposer un bloc allonge le temps de calcul d'une commande CSHIFT ou EOSHIFT.

Les cas tests qui suivent ne consistent plus à réaliser une advection comme c'était le cas pour les tests 1 et 2, mais à réaliser un stencil: on affecte une valeur en chaque point et on somme celle-ci avec celle de ses huit voisins affectés du coefficient 0.5.

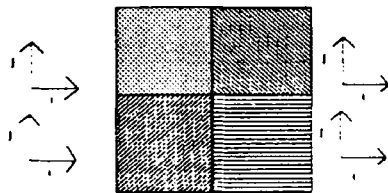
3.3 Tests sur un stencil

a) Il y a en tout un seul bloc $256*256$

Temps total pour 100 iterations: 3.08s

b) Ce bloc a été subdivisé en quatre sous-blocs $128*128$.

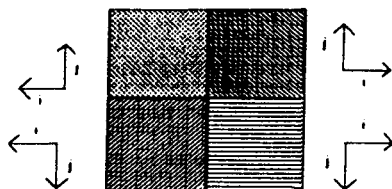
L'orientation des indices est la même pour chaque bloc



Temps total pour 100 itérations: 3.80s

Temps de communication : 0.3s

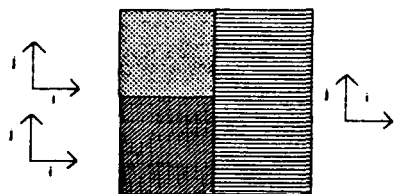
c) Même disposition qu'en 3.2, mais l'orientation des indices est modifiée



Temps total pour 100 itérations: 3.49s

Temps de communication : 0.087s

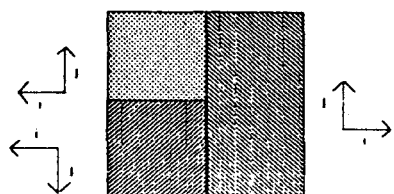
d) Il y a trois blocs: deux $128*128$ et un $128*256$



Temps total pour 100 itérations: 5.15s

Temps de communication : 2.02s

e) On permute l'orientation des indices:



Temps total pour 100 itérations: 5.13s

Temps de communication : 2s

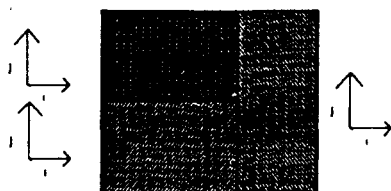
L'utilisation de blocs de tailles différentes semble entraîner des conditions limites coûteuses.

3.3.1 Stencil sur un maillage $192*128$ que l'on divise en trois blocs.

a) 1 seul bloc $192*128$

Temps total pour 100 iterations: 3.73s

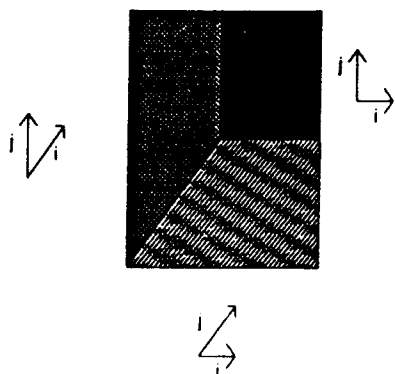
b) Ce bloc est divisé en trois sous-blocs $128*64$.



Temps total pour effectuer 100 itérations: 2.99s
temps de communication : 0.49s

Le temps de calcul pour un bloc seul est plus long que lorsqu'il y a trois sous-blocs, car $192*128$ n'est pas une taille appropriée pour le compilateur Paris, ce qui ne serait pas le cas avec le compilateur slice-wise.

3.3.2 Stencil pour trois blocs de mêmes dimensions avec point triple



Chacun des blocs comporte 128 lignes et 128 colonnes. Cette géométrie permet de tester le cas où il y a un point triple. La condition limite entre le bloc du bas et celui de gauche consiste en la somme des valeurs situées sur la première colonne du bloc du bas avec celles situées sur la première ligne du second bloc.

Temps total de calcul : 2.66s
Temps de communication: 0.32s

4 Conclusion

Deux éléments principaux ressortent de cette étude:

- L'utilisation de ALIGN n'est pas conseillée lorsqu'on utilise des commandes CSHIFT ou EOSHIFT.
- L'utilisation de maillages multiblocs peut ne pas être coûteuse à condition d'utiliser des blocs de même taille et d'orienter les indices de manière optimale. Les conditions frontières devant être traitées une par une, plus il y aura de blocs plus le coût de la méthode multiblocs sera élevé. Le traitement de chacune des frontières représentera alors environ 3% du temps total de calcul.

L'utilisation de blocs de même taille est souhaitable principalement pour

deux raisons:

- Coût moins élevé.
- Plus grande souplesse de programmation.

En effet, si les blocs ont la même taille, les matrices se rapportant à ces blocs peuvent être indexées: la structure serait par exemple `bloc(i,:,:) i` étant le numéro du bloc. Si la taille de ces blocs diffère, alors cette structure deviendrait: `bloc1(:,:), bloc2(:,:), bloc3(:,:), ...` ce qui réduirait la lisibilité et la modularité du programme.

Le compilateur CM-FORTRAN de la CM5 n'étant actuellement pas optimisé, il est difficile d'évaluer le coût d'une structure multiblocs sur ce type d'architecture. Celui-ci devrait cependant être moindre que sur CM2, en effet les communications entre les processeurs devraient avoir été améliorées d'environ un facteur dix (d'après TMC). Les communications générales devraient donc être beaucoup moins coûteuses que sur CM2, et plus compétitives par rapport aux communications NEWS. Sur CM5, un maillage multiblocs ne devrait pas être beaucoup plus coûteux qu'un maillage comportant un seul bloc.

REFERENCES

- (1) **Semtner**, Finite-difference formulation of a world ocean model. Proc. NATO, Institute of Advanced Physical Oceanographic Numerical Modelling, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, in press.
- (2) **Arakawa** 1972: Design of the UCLA General Circulation Model. Numerical Simulation of Weather and Climate, Tech. Rept. 7, department of Meteorology, university of California, Los Angeles, 116pp.
- (3) **UNESCO**, 1981: Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. UNESCO Technical Papers in Marine Sci. N0. 36, UNESCO, Paris.
- (4) **K. Bryan and Michael D. Cox** An Approximate Equation of State for Numerical Models of Ocean Circulation. Journal of physical Oceanography. 1972. Vol 2, p510-514.
- (5) **R.D Smith, J.K. Dukowicz, R.C. Malone**, Parallel Ocean General Circulation Modeling, Physica D 60 (1992), pp38-61, North Holland
- (6) **Asselin, R.A.**, 1972: Frequency filter for times integration. Mon. Wea. Rev.,100,487-490.
- (7) **P. Loreaux**, Simulation d'écoulements multifluides sur la Connection Machine (note en preparation).