

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Conception d'une couche anéchoïque multicellulaire linéaire

Tony Nicolas

Université Saint-Joseph, Faculté D'ingénierie Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth
11-514 CST Riad El Solh, 11072050 Beyrouth, Liban
Tony.Nicolas@usj.edu.lb

Dans cet article, nous proposons la conception d'une couche anéchoïque multicellulaire. Cette couche enveloppera le corps d'un sous-marin et son animation par un algorithme adéquat rendra ce dernier transparent aux ondes sonars incidentes. L'architecture électronique de cette couche sera basée sur un modèle systolique. En terme plus informatique, sur l'architecture d'une machine parallèle de type **SIMD** (Single Instruction Multiple Data). Chaque cellule de la couche se comportera d'une façon indépendante et communiquera par lien directe avec ses voisins. Toutes les cellules exécuteront le même algorithme de contrôle sur des données locales. Dans ce papier, nous présenterons en particulier l'aspect linéaire de la couche qui sera capable d'absorber les ondes sonars provenant simultanément et indépendamment de plusieurs sources.

1 Introduction

On cherche à couvrir une surface donnée par une couche "intelligente", l'animation de cette couche par un mouvement adéquat permet de la rendre transparente aux ondes incidentes.

Dans la suite, nous exposons l'architecture de la couche, la condition locale de mouvement qu'elle doit satisfaire pour "absorber" les ondes incidentes, ainsi que la manière suivant laquelle on "transpose" ce comportement local en comportement global capable de réaliser l'absorption des ondes incidentes.

Nous terminons par l'exposition d'un certain nombre de simulations numériques dans le cas d'une couche plane rectangulaire exposée à une et à deux ondes incidentes.

2 Architecture de la couche

La couche sera composée de l'agrégation d'une multitude de cellules identiques élémentaires. Chaque cellule possède dans un état plus ou moins rudimentaire les trois fonctions suivantes : détection, émission et calcul.

La figure 1 illustre le concept multicellulaire de la couche (on y représente deux cellules complètes).

La détection sera assurée, dans le cas où on n'utilise pas de couche passive, par des petits hydrophones qui peuvent mesurer la pression acoustique incidente.

L'émission sera assurée par un matériau piézo-électrique, qui constitue la partie motrice de la paroi de la couche et dont la vitesse doit être asservie par un signal de consigne calculé par la fonction calcul de la cellule.

Le calcul sera assuré par un microprocesseur élémentaire qui effectue des opérations arithmétiques simples, qu'on détaillera plus loin. Une horloge centrale assure la synchronisation de tous les microprocesseurs.

Chacune des cellules communique directement (par voie électronique) avec ses voisins (Nord, Sud, Est, Ouest,

Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est, Sud-Ouest). Elle communique aussi avec le système global par un bus qui permet, entre autres, la mise à jour des programmes, la consultation des données propres à chaque microprocesseur, la commande simultanée de tous les microprocesseurs.

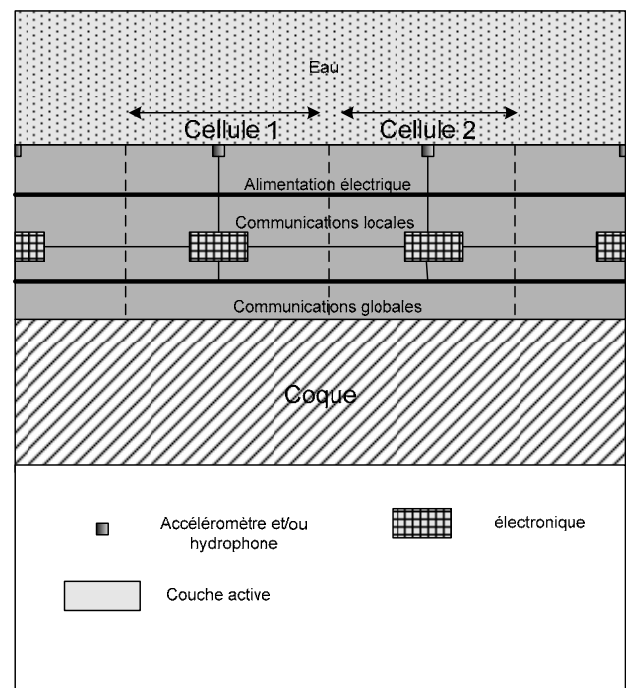


Figure 1 : coupe verticale de la couche

Il est à noter le très grand nombre de cellules à utiliser, en effet la taille de chaque cellule ne doit pas dépasser 10 cm si on souhaite couvrir, par exemple, une bande passante du système située entre 0 et 4000 Hz, ainsi pour couvrir une surface de 1000 m², nous aurons besoin d'utiliser 100 000 cellules.

L'architecture de notre couche peut être simulée par l'architecture d'une machine massivement parallèle de type SIMD [1] à condition de signaler que la construction de ce type de couche nécessitera une architecture dédiée à cette application.

3 Aspect théorique

Considérons un domaine Ω de frontière $\partial\Omega$, où Ω est le complémentaire d'un domaine borné de même frontière $\partial\Omega$ (figure 2).

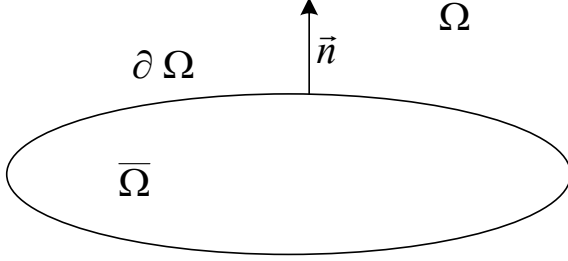


Figure 2 : Coque submergée

Les équations de l'acoustique (1) sont alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \Delta p = 0 \quad \text{dans le domaine } \Omega \\ -\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \frac{\partial v_n}{\partial t} \quad \text{sur la frontière } \partial\Omega \end{array} \right\} \quad (1)$$

où p est la pression acoustique totale qui est la somme de la pression incidente et de la pression secondaire (réfléchi et/ou diffractée), c la célérité du son, v_n la composante normale du vecteur vitesse acoustique (la normale étant dirigée vers l'intérieur de Ω), v_n est considérée comme inconnue. A ce système il convient de rajouter la condition de rayonnement de Sommerfeld voir l'équation (2) pour la pression secondaire $p_{\text{sec}} = p_{\text{diffractée}} + p_{\text{réfléchi}}$.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial p_{\text{sec}}}{\partial r} + \frac{1}{c} \frac{\partial p_{\text{sec}}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2)$$

On considère le cas d'une onde plane car on suppose que la source sonore est encore assez éloignée.

Considérons un point M de $\partial\Omega$, et un instant t donné, la pression acoustique incidente p_{inc} due à une onde plane qui se dirige dans la direction d'un vecteur unitaire $-u$ a pour forme générale (3) :

$$p_{\text{inc}}(M, t) = f \left(t + \frac{OM \cdot u}{c} \right) \quad (3)$$

Où f est une fonction numérique qui décrit la forme de l'onde.

Il y a absence de la pression secondaire (c'est-à-dire absorption complète de l'onde incidente) si, et seulement si, la pression incidente et la vitesse normale sont solutions du système (1).

En effet, la pression secondaire sera solution du système homogène associé à (1) et à la condition de rayonnement de Sommerfeld. Elle est donc nulle partout dans le domaine Ω . Un simple calcul donne alors la condition à réaliser à la frontière :

$$v_n(M, t) = -\frac{p_{\text{inc}}(M, t)}{\rho c} \cos(\theta) \quad (4)$$

où θ représente l'angle d'incidence de l'onde incidente par rapport à la normale voir (figure 3).

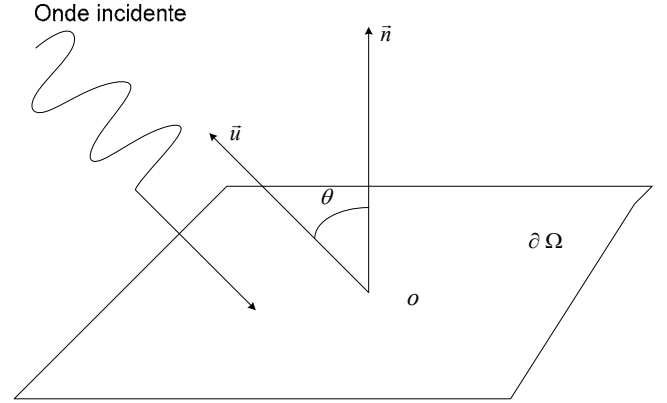


Figure 3 : onde incidente

4 Animation de la couche

Schématiquement, l'algorithme d'animation de la couche sera exécuté de la façon suivante : **Chaque** cellule reçoit de ses voisines, à l'instant t , des éléments qui lui permettent d'avoir une estimation de la pression acoustique qu'elle devrait mesurer à l'instant $t + \Delta t$. Après comparaison de l'estimation reçue à la mesure qu'elle a faite, la cellule contribue à l'algorithme en effectuant une mise à jour de ces éléments et en les transmettant aux voisines.

La difficulté principale à résoudre est donc d'identifier une onde plane, et certainement une somme d'ondes planes (plusieurs émetteurs peuvent agir en concert...), en **temps réel** au sens propre du terme de cette expression.

Nous avons donc affaire à trois types de discrétisation, une discrétisation temporelle pour l'échelle du temps, une discrétisation du demi-espace pour capter la direction d'incidence ainsi que la fonction f , et une discrétisation surfacique pour les cellules de la couche.

4.1 Les voies d'analyses

Soit en un point M de la paroi le plan tangent $(M, \vec{x}, \vec{y})$ rapporté au repère local $(M, \vec{x}, \vec{y}, \vec{n})$ et $\vec{u}$ le vecteur unitaire d'argument φ et d'incidence θ , comme indiqué sur la figure 3. Une onde plane en provenance de la direction $\vec{u}$ sera approchée par une somme d'ondes planes provenant de direction $\vec{u}_i$ définie par des angles φ_i et θ_i fixée à l'avance de sorte à couvrir d'une manière homogène le demi-espace. Ces directions seront nommées des voies d'analyses (figure 4).

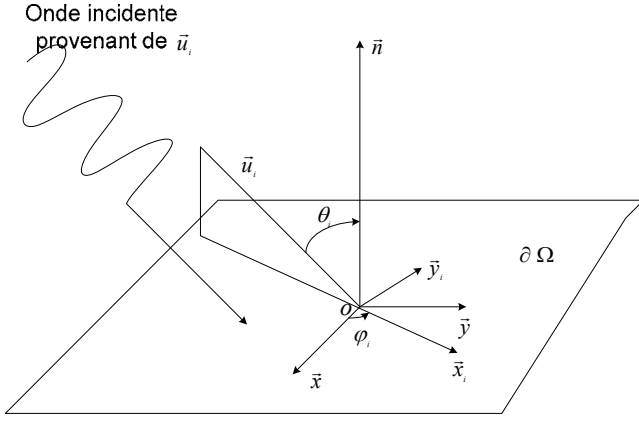


Figure 4 : ième voie d'analyse

4.2 Algorithme de réactualisation

Avant l'instant t_k la cellule cible reçoit des voisines des prévisions $\tilde{p}_i$ sur les valeurs à l'instant t_k des différentes composantes p_i de la pression incidente. Ces prévisions proviennent, pour la voie i , des cellules qui sont en amont d'elle pour la direction $\vec{u}_i$.

La cellule effectue alors la somme (formule 5):

$$\tilde{p}_{inc} = \sum \tilde{p}_i \quad (5)$$

Et son asservissement réalise la vitesse pariétale correspondante à l'instant t_k (formule 6) :

$$\tilde{v}_n = -\frac{1}{\rho c} \sum \tilde{p}_i \cos(\theta_i) \quad (6)$$

Un travail continu d'interpolation doit être effectué pour trouver les valeurs aux instants t_k .

A ce même instant, la cellule mesure la pression acoustique totale qui est la somme de la pression incidente et de la pression réémise par la coque, qui le système étant imparfait ne sera pas malheureusement nulle. Si on considère que cette dernière est négligeable (ou bien que la couche fonctionne en mode antenne), la cellule mesure la différence et actualise les estimations sur les diverses composantes en distribuant l'erreur sur toutes les voies (formule 7) :

$$\tilde{p}_{inc} = \tilde{p}_{inc} - \frac{\tilde{p}_{inc} - p_{inc}}{I_{Max}} \quad (7)$$

Où I_{Max} désigne le nombre total des voies d'analyses.

Ce qui vient d'être décrit doit être appliqué sur toutes les cellules de la couche.

4.3 Discretisation surfacique

On considère un recouvrement de la coque par des cellules carrées de côté Δx . A chaque cellule on associe un repère relatif dont l'origine est le centre de la cellule.

4.4 Discretisation temporelle

La condition d'anéchoïcité (formule 6) doit être réalisée à des instants t_k espacés d'un pas de temps Δt . Cette condition sera réalisée d'une façon synchrone sur toutes les cellules de la couche.

5 Résultats de simulations

Nous avons simulé l'algorithme de détection temporel (sans tenir compte de l'imperfection de la couche) sur une couche plane de dimensions de 25 m², couverte par 2500 cellules carrées de 10 cm de côté. L'onde incidente étant une onde plane provenant de la direction u , où u est définie par $\theta = 60^\circ$ et $\varphi = 45^\circ$, sa fonction d'onde est une arche de sinusoïde à 500 Hz, la vitesse du son est de 1500 m/s.

Cette simulation a été effectuée sur la MasPar Mp2, il s'agit d'une machine massivement parallèle de type SIMD, composée de 16384 processeurs élémentaires de 4-bits cadencés à 12.5 Hz, où chaque processeur peut communiquer matériellement avec ses huit voisins immédiats [1]. Nous avons utilisé 2500 processeurs pour cette simulation. A noter que le temps de simulation est indépendant de la taille de la couche, c'est-à-dire du nombre de cellules, il s'agit en fait d'un algorithme de complexité constante.

Les figures 5 et 6 montrent des photos de la plaque soumise à l'onde incidente à des temps donnés. On présente sur ces photos la vitesse calculée par la plaque pour obtenir l'anéchoïcité.

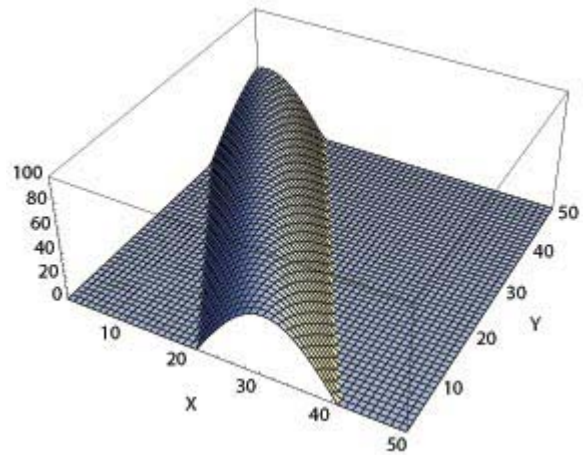


Figure 5 : Photos de la couche à l'instant $t = 2000 \mu s$

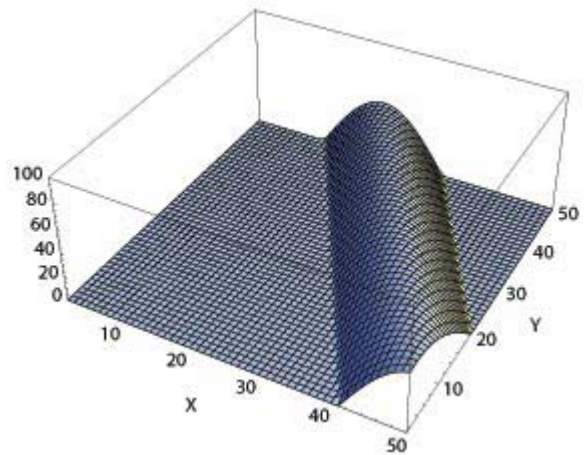


Figure 6 : Photos de la couche à l'instant $t = 3000 \mu s$

Les figures 7, 8, 9, 10 et 11 montrent des photos de la plaque soumise à deux ondes incidentes. L'onde de départ

à laquelle on a ajouté une deuxième onde plane provenant de la direction $\theta = 60^\circ$ et $\varphi = 135^\circ$.

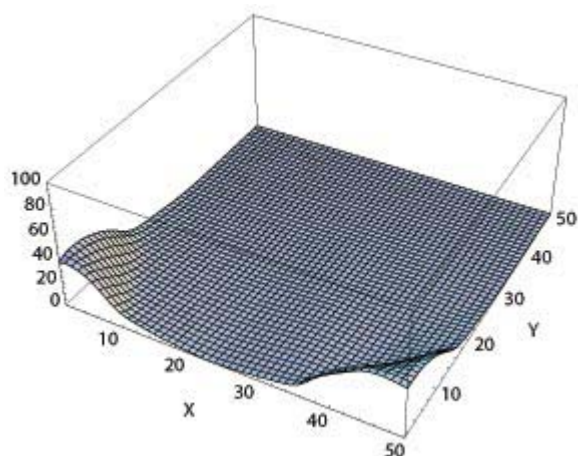


Figure 7 : Photos de la couche à l'instant $t = 500 \mu s$

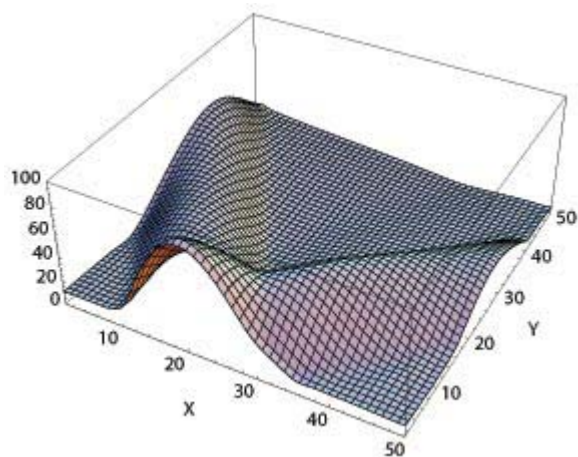


Figure 8 : Photos de la couche à l'instant $t = 1500 \mu s$

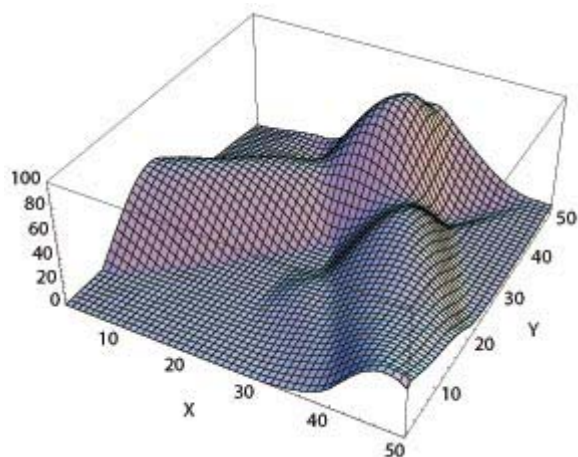


Figure 9 : Photos de la couche à l'instant $t = 3000 \mu s$

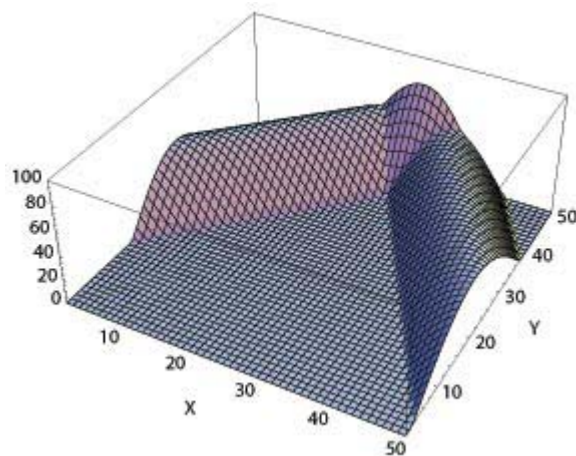


Figure 10 : Photos de la couche à l'instant $t = 3500 \mu s$

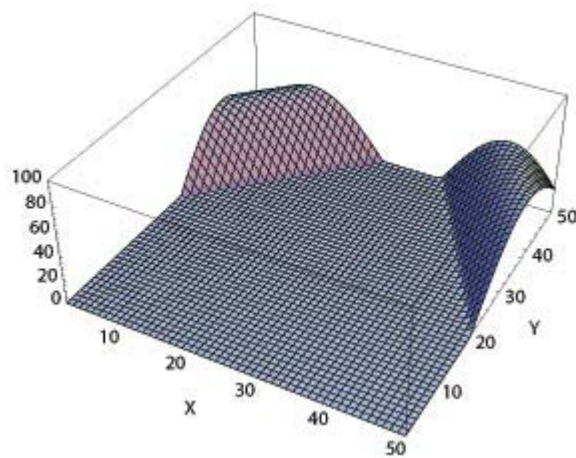


Figure 11 : Photos de la couche à l'instant $t = 4000 \mu s$

6 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté le concept d'une couche anéchoïque multicellulaire rudimentaire. Le résultat important à tirer des simulations effectuées se situent dans le comportement linéaire de cette couche face à la présence de plusieurs sources émettrices simultanées. Un autre point important concerne l'existence d'un algorithme de complexité constante qui anime cette couche. En effet, le temps des calculs à effectuer par les microprocesseurs est indépendant du nombre de cellules de la couche.

Plusieurs améliorations peuvent être apportées au concept de la couche. En effet, dans les simulations présentes nous avons considérés que la couche absorbe parfaitement les ondes incidentes. Or la pression créée par l'erreur de détection de la pression incidente sera à intégrer dans l'algorithme de détection, en communiquant et en distribuant, par voie directe, cette erreur sur toutes les voies d'analyses. Une autre amélioration consiste à actualiser les voies d'analyses de telle sorte à cibler, au cours du temps, d'une manière plus précises les directions d'incidences.

Références

- [1] Digital Equipment Corporation. Decmpp SX Programming Language (AINSI) User's Guide. Part Number AA-PVQ-TE. February 1993. Maynard Massachusetts.