# Calcul scientifique et audio numérique

#### Matthieu Aussal

Ingénieur de recherche, responsable du groupe X-Audio Centre de Mathématiques appliquées de l'Ecole polytechnique





Séminaire DEFI Vendredi 28 février 2020





#### Groupe X-Audio

#### CALCUL HAUTE PERFORMANCE POUR L'ACOUSTIQUE

Eléments finis, équations intégrales, physique ondulatoire,



#### AUDIO ORIENTÉ OBJET

Mixage orienté objet, binaural interactif, traitement du signal temps-réel,



#### ACOUSTIQUE DES SALLES

Réverbération, ray-tracing, archéologie, réalité virtuelle,



#### LOCALISATION ET GUIDAGE

Réalité augmentée, synthèse binaurale, sonification, traitement du signal temps réel,



## Principales thématiques

#### • Calcul Scientifique :

- Elements finis, équations intégrales
- Méthodes de compression

#### • Audio numérique

- Audio spatialisé, captation et restitution
- Acoustique des salles et auralisation
- Localisation dans l'espace

#### Développement logiciel

- Prototypes en Matlab (Gypsilab, myBino, libRta, etc)
- Librairies industrielles en C++ (matriX, ambisoniX, etc)

#### Partenaires



inventeurs du monde numérique





CONSERVATOIRE **NATIONAL SUPÉRIEUR** DE MUSIQUE ET DE DANSE DE PARIS







SATT. **PARIS-SACLAY** 





















## GYPSILAB

#### https://github.com/matthieuaussal/gypsilab



#### <u>Avec la participation de :</u>

- François Alouges
- Martin Averseng
- Marc Bakry
- Yosra Boukari
- Algiane Froehly
- Houssem Haddar

#### <u>A venir :</u>

- Sopie Brou
- Dorian Lerévérend
- Philippe Moireau

# Maillage

#### <u>https://github.com/matthieuaussal/gypsilab/openMsh</u>

- Lecture/écriture de maillages (.ply, .vtk, .stl, .mesh, .msh, etc.)
- n-d dimensions (n=0 à 3), simplex uniquement
- Affichage 3d, avec ou sans données (plot)
- Calcul de données élémentaires (volume, tangentes, normales, etc.)
- Outils d'extraction (surfaces, arrêtes, noeuds)
- Outils de manipulations (union, intersection, rotation, etc.)
- Nettoyage et raffinement (surface uniquement)
- Arbres récursifs (binaire, octree)

classdef msh

#### properties

```
vtx = []; % VERTEX COORDINATES (3 dimensions)
```

elt = []; % ELEMENTS LIST (particles, edges, triangles or tetrahedron)

```
col = []; % ELEMENT COLOR (group number)
```

end

## Re-Maillage

<u>https://github.com/matthieuaussal/gypsilab/openMmg</u>

- Interface au remailleur MMG tools, avec Algiane Froehly (INRIA)
- Utilise la structure msh
- Maillage triangle 2d, 3d
- Maillage tétra 3d
- Interface par lecture/écriture de fichiers .mesh
- Toutes les options de MMG sont disponibles (maillage uniforme, carte de taille, anisotropie, etc...)

## Exemples d'utilisation



# Exemples d'utilisation



### Exemples d'utilisation



### Quadratures et Elements finis

<u>https://github.com/matthieuaussal/gypsilab/openDom</u> <u>https://github.com/matthieuaussal/gypsilab/openFem</u>

- Boite à outil d'éléments finis, avec François Alouges (CMAP)
- openDom :
  - Quadrature numérique de Gauss (nd)
  - Fonction intégral() pour écrire des formulations variationelles en matlab (e.g. freefem, phénix, etc.)
  - Intégration semi-analytique de noyaux intégraux (2d, 3d)
- openFem :
  - Elements finis PO, P1, P2 (nd) Raviart-Thomas, Nedelec (2d, 3d)
  - Condition de Dirichlet et jonctions par élimination
  - Intégrale sur domaine et intégrale de trace

## Exemple d'utilisation FEM

% Gypsilab path run('../../addpathGypsilab.m')

% Meshes mesh = mshDisk(1000,1);

% Domain omega = dom(mesh,3);

% Finites elements space u = fem(mesh,'P1'); v = fem(mesh,'P1');

```
% Graphical representation
plot(mesh,'w');
hold on
plot(omega)
plot(u,'go')
hold off
axis equal;
title('Mesh representation')
xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z');
alpha(0.99)
```

% Rigidity matrix K = integral(omega,grad(u),grad(v));

% Mass matrix tic M = integral(omega,u,v); toc

% Right hand side f = @(X) X(:, 1).^2; F = integral(omega,u,f);

% Solving uh = (K+M)\F ;

% Plot the solution figure graph(u,uh); title('Solution') xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z'); view(30,30)

disp('~~> Michto gypsilab !')

#### Exemple d'utilisation FEM



### Exemple d'utilisation FEM



### Exemple d'utilisation BEM

#### % Parameters

N = 1e3 X0 = [-1 0 0] k = 5 PW = @(X)  $exp(1i^{k^{X}X'}X');$ 

% Meshes sphere = mshSphere(N,1); square = mshSquare(5\*N,[5 5]);

#### % Graphical representation

figure plot(sphere) axis equal hold on plot(square) plot(sphere,real(PW(sphere.vtx))) plot(square,real(PW(square.vtx))) title('Incident wave') xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z'); hold off

% Helmholtz kernel =  $\exp(ik|x-y|)/|x-y|$ Gxy = @(X,Y) 1/(4\*pi) .\* femGreenKernel(X,Y,'[ $\exp(ikr)/r$ ]',k);

% Domain sigma = dom(sphere,3);

% Finite elements u = fem(sphere,'P1'); v = fem(sphere,'P1'); % Boundary operator S S = integral(sigma,sigma,u,Gxy,v);

% Regularization Sr Sr = regularize(sigma,sigma,u,'[1/r]',v);

% Incident wave RHS = - integral(sigma,u,PW);

% Solve linear system [S] \* lambda = P0 lambda = (S+Sr) \ RHS;

% Radiative operator Sdom = 1/(4\*pi) .\* integral(square.vtx,sigma,Gxy,v);

% Regularization Sreg = 1/(4\*pi) .\* regularize(square.vtx,sigma,'[1/r]',v);

% Domain solution Pdom = (Sdom + Sreg) \* lambda + PW(square.vtx);

% Graphical representation figure plot(sphere,'w') axis equal; hold on plot(square,abs(Pdom)) title('Total field solution') colorbar hold off

disp('~~> Michto gypsilab !')

#### Exemple d'utilisation BEM



#### Exemple d'utilisation BEM



## Matrices hiérarchiques (H-Matrix)

<u>https://github.com/matthieuaussal/gypsilab/openHmx</u>

- Compression et algèbre hiérarchique en matlab natif
- Arbre binaire (nd) et calculs récursifs
- Feuilles pleines (full), creuses (sparse) ou compressées (AB)
- Algo de recompression ACA, SVD, RSVD, QRSVD, etc.
- Pivotage total (plein/creux) ou partiel (noyaux G(X,Y))
- Surcharges des opérateurs de base (+,-,\*,/)
- Factorisation Choleski, LDLt, LU, etc.
- Affichage de la structure hiérarchique (spy)
- Complexité Nlog(N) pour les noyaux non oscillants, N^(3/2) en régime harmonique limite (kd=1).

[...] % Boundary operator S tol = 1e-3; S = 1/(4\*pi) .\* integral(sigma,sigma,u,Gxy,v,tol);

% Regularization Sr Sr = 1/(4\*pi) .\* regularize(sigma,sigma,u,'[1/r]',v); S = S + Sr;

% Incident wave RHS = - integral(sigma,u,PW);

```
% Solve linear system [S] * lambda = P0
[L,U] = lu(S);
lambda = U \ (L \ RHS);
```

% Visu

figure subplot(2,2,1:2); spy(S) subplot(2,2,3); spy(L) subplot(2,2,4); spy(U)

% Radiative operator

Sdom = 1/(4\*pi) .\* integral(square.vtx,sigma,Gxy,v,tol); [...] Rajouter un paramètre de précision « tol » au mot clé **intégral() !** 













# Fast Free-memory Method (FFM)

<u>https://github.com/matthieuaussal/gypsilab/openFfm</u>

- Convolution type Fast Multipole, avec Marc Bakry (CMAP)
- Compression analytique de noyaux intégraux (3d)
  - Interpolation Lagrange pour tout noyaux
  - Interpolation Geggenbauer pour Helmholtz
- Octree et calculs récursifs
- Résolution uniquement itérative
- Aucun stockage mémoire temporaire -> objectif HPC!
- Complexité Nlog(N) pour les noyaux non oscillants
- Complexité N^(3/2) théorique régime harmonique limite (kd=1),
- Complexité Nlog(N) observée pour tout noyaux/fréquence

#### Fast Free-memory Method (FFM)



k = 1

Ν

#### Fast Free-memory Method (FFM)



## Exemple d'utilisation FFM

[...] % Boundary operator S S = 1/(4\*pi) .\* integral(sigma,sigma,u,'[exp(ikr)/r]',k,v,tol);

% Regularization Sr Sr = 1/(4\*pi) .\* regularize(sigma,sigma,u,'[1/r]',v); S = S + Sr;

% Incident wave RHS = - integral(sigma,u,PW);

% Solve linear system [S] \* lambda = P0 lambda = mgcr(@(V)S\*V,RHS,[],tol,100);

```
% Radiative operator
Sdom = 1/(4*pi) .* integral(square.vtx,sigma,'[exp(ikr)/r]',k,v,tol);
[...]
```

#### Exemple d'utilisation FFM



+ Iteration 58 in 3.49 seconds with relative residual 1.02e-03. + Iteration 59 in 3.48 seconds with relative residual 9.67e-04. mgcr converged at iteration 59 to a solution with relative residual 9.669e-04. Operateur S très mal conditionné...

Utiliser formulation « bien posée »!

#### Exemple d'utilisation FFM



#### Comparaison de solveur rapide (2015)

**Context :** For all points  $(\mathbf{x}_i)_{i \in [1,N]}$  and  $(\mathbf{y}_j)_{j \in [1,N]}$  in  $\mathbb{R}^3$ , compute :

$$u(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^N \frac{1}{4\pi |\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_j|} f(\mathbf{y}_j)$$

**Results :** 4 cores. at 2.9 GHz, 32 GO de ram, Matlab R2014a,  $(\mathbf{x}_i)_{i \in [1,N]}$  and  $(\mathbf{y}_j)_{j \in [1,N]}$  on the unit sphere  $S^2$  :

N	Time (s)	Time 4 cores (s)	Memory peak		
104	2.04	0.72	1 Mo		
10 <sup>5</sup>	328	83.9	10 Mo		

#### Comparaison de solveur rapide (2015)

**Context :** For all points  $(\mathbf{x}_i)_{i \in [1,N]}$  and  $(\mathbf{y}_j)_{j \in [1,N]}$  in  $\mathbb{R}^3$ , compute :

					Λ /				
	N	Build t	ime (s	)	MV time (s)	LU time (s)	Mem		
		1 core	4 cor	es	1 core	1 core			
Result	104	3.18	3.25		0.16	9.88	100 Mo	)	
	10 <sup>5</sup>	37.9	19.2		1.68	193	1 Go		
<b>(∧</b> <i>i</i> ) <i>i</i> ∈[	10 <sup>6</sup>	518	214		25	4120	10 Go		
	N	Time	e (s)	Т	ime 4 cores	(s) Memo	Memory peak		
	104	2.04			0.72	1	1 Mo		
	10 <sup>5</sup>	32	8		83.9	10	10 Mo		

	Ν	Time (s)	) Time	e 12	cores (s)	Error L2		Mem	ory peak		
C	10 <sup>4</sup>	2.04		9.08		8.03 10 <sup>-5</sup>		1 Mo		)	
	10 <sup>5</sup>	9.30		1	7.1	1.34 10		-4	1	0 Mo	
	10 <sup>6</sup>	87.8		33.4 1.		1.	35 10 <sup>-4</sup>		100 Mo		
	107	1063		169		$1.98  10^{-4}$		-4	1 Go		
Conte	10 <sup>8</sup>	_		14	499	$1.81 \ 10^{-4}$		-4	1	.0 Go	pute :
	10 <sup>9</sup>	-		11	.340	$3.11\ 10^{-4}$		-4	100 Go		
	N	Build t	time (s)		MV time (s)		LU t	U time (s)		Mem	
		1 core	4 cores	s	1 core	1 core		1 core			
Docul	104	3.18	3.25		0.16 1.68 25		9.88			100 Mo	- ),
$(\mathbf{x}_i)_i$	10 <sup>5</sup>	37.9	19.2					193 4120		1 Go	
<b>(^</b> <i>i</i> ) <i>i</i> ∈[	10 <sup>6</sup>	518	214				Z			10 Go	
	N	Time	(s)	Ti	Time 4 cores (s)		(s)	Memory peak		-	
	104	2.0	)4		0.72			1 Mo			
	10 <sup>5</sup>	32	8		83.9			10 Mo			

# Block Matrix Method (BMM)

<u>https://github.com/matthieuaussal/gypsilab/openBmm</u>

- Algèbre par bloc de type :
  - Plein (full)
  - Creux (sparse)
  - Hiérarchique (hmx)
  - Produit matrice-vecteur (ffm)
- Calcul parallèle en mémoire partagée ou distribuée
- Formulations variationelles vectorielles (Stokes, Calderon etc.)
- Couplage multi-physique (FEM/FEM, FEM/BEM, BEM/BEM)
- Surcharges des opérateurs de base (+,-,\*,/)
- Concaténation de structures simplifiée
- Affichage de la structure bloc (spy)

#### Exemple de Block Matrix


### Lancer de rayons

<u>https://github.com/matthieuaussal/gypsilab/openRay</u>

- Tir de rayons droits, avec Robin Gueguen (ISCD)
- Outil pour l'acoustique des salles et l'auralisation
- Réflexions spéculaires sur éléments triangles
- Accélération par méthode type « Divide & Conquer »
- Générations de sources images et réponses impulsionelles















∗

#### APPLICATIONS ...

## Helmholtz - Calcul de filtre HRTF

Maillage par Symare & MMG





# Helmoltz - Diffraction HF (beTSSI)



# Helmoltz - Diffraction HF (beTSSI)



# Maxwell - Diffraction HF (NASA Almond)



# Maxwell - Diffraction HF (NASA Almond)



# Maxwell - Diffraction HF (ISAE 2019)







Coll. Marc Bakry



Coll. Marc Bakry







FIGURE 15 – Vue transversale du maillage de la table



FIGURE 15 – Vue transversale du maillage de la table



Coll. François Alouges











Coll. Emile Parolin







# Autres applications

- Fluide de Stokes (A. Lefevre, L. Giraldi, L. Berti, ...)
- Simulation EEG (A. Gramfort et al)
- Filtrage de Kalmann (P. Moireau)
- Complétion de données (Y. Boukari et H. Haddar)
- Acoustique de salles complexes (R. Gueguen)





FIN DE LA 1ère PARTIE...

### Propagation du son dans l'air





## Propagation du son dans l'oreille



# Propagation du son dans la cochlée



### Fréquence audibles














































## Fonction de transfert de tête (HRTF)







# Mesure des HRTF









# Simulation numérique des HRTF



Acquisition morphologique



Maillage de calcul (géométrie)

$$\begin{cases} -(\Delta u^{i} + k^{2}u^{i}) = 0 \in \Omega^{i}, \\ -(\Delta u^{e} + k^{2}u^{e}) = 0 \in \Omega^{e}, \\ \lim_{r \to +\infty} r (\partial_{r}u^{e} + iku^{e}) = 0, \end{cases}$$
$$u(\mathbf{x}) = \int_{\Gamma} G(\mathbf{x}, \mathbf{y})\lambda(\mathbf{y})d_{y} - \int_{\Gamma} \partial_{n}G(\mathbf{x}, \mathbf{y})\mu(\mathbf{y})d_{y}.$$

Equations de propagation des ondes



Mesures numériques

#### APPLICATIONS ...

# Ingénierie du son

Coll. A. Baskind, J.C. Messonier, F.Salmon



# Ingénierie du son

Coll. A. Baskind, J.C. Messonier, F.Salmon






















#### Jeux vidéo

#### PSC X2015



## Guidage audio pour le sport

Coll. S. Ferrand, F. Alouges et al



## Guidage audio pour le sport

Coll. S. Ferrand, F. Alouges et al



# Guidage audio pour le sport

Coll. S. Ferrand, F. Alouges et al



### Mon Cartable Connecté

Coll. D. Lereverend, H. Haddar et al



## Mon Cartable Connecté

Coll. D. Lereverend, H. Haddar et al



## Mon Cartable Connecté

Coll. D. Lereverend, H. Haddar et al



#### CONCLUSION & PERSPECTIVES