

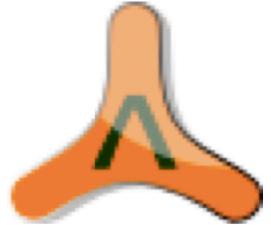
# Uds/IRMA et AxesSim : Histoire d'une collaboration Université / PME fructueuse et en marche

Rencontres Maths-Industrie SMAI, juin 2015

**Mathanaël MUOT – AxesSim**  
[Nathanael.muot@axessim.fr](mailto:Nathanael.muot@axessim.fr)

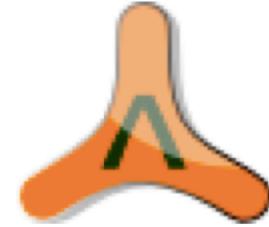
**Philippe HELLUY – IRMA Uds**  
[helluy@math.unistra.fr](mailto:helluy@math.unistra.fr)

# AxesSim



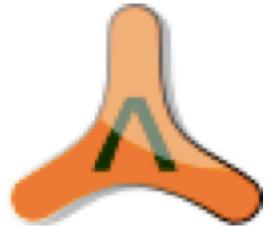
- PME de 10 docteurs et ingénieurs fondée en 2007 proche de Strasbourg
- Développement de solutions de simulation électromagnétiques innovantes :
  - CuToo : Plate-forme de simulation dans le Cloud
  - Environnements de simulation 3D dans le domaine temporel
  - Solution de modélisation de harnais de câblages complexes
- Domaines d'application :
  - Aéronautique : Certification foudre et HIRF
  - Systèmes complexes : CEM, Placement d'Antennes, Environnements EM, ...
  - Conception / Modélisation d'antennes ...
- Clients :
  - Industriels : Thales, Dassault aviation, Safran, ...
  - Institutions : CEA, DGA, ONERA, ...

# Un terreau propice



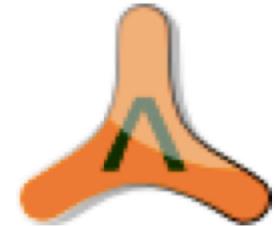
- AxesSim est une PME innovante :
  - Activité continue de recherche en interne.
  - Collaborations avec des universités et instituts de recherche
- AxesSim est riche de plusieurs collaborations fructueuses construite sur le long terme et qui s'inscrivent dans la durée :
  - ONERA /DEMR (depuis la création d'AxesSim - 2007)
    - ✓ Contrat de collaboration et de distribution d'outils (2014)
    - ✓ → Industrialisation d'une méthode de ligne de transmission ;
    - ✓ → Industrialisation d'une méthode Maxwell 3D GD ;
    - ✓ ← Mise à disposition de l'environnement de mise en œuvre.
  - Xlim (depuis 2009)
    - ✓ Contrat de collaboration et de distribution d'outils (2012)
    - ✓ → Industrialisation et commercialisation d'un code Maxwell 3D FDTD ;
    - ✓ ← Mise à disposition de l'environnement de mise en œuvre.

# Genèse de la collaboration IRMA / AxesSim (1/2)



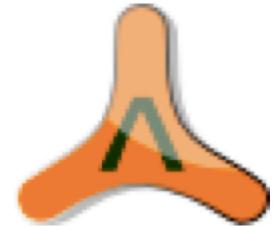
- Point de départ (2011) : l'ONERA/DEMR Toulouse sollicite AxesSim afin de d'industrialiser leur travaux de recherche sur la méthode GD/Maxwell.
- La méthode GD :
  - possède de très bonnes propriétés numériques ;
  - Mais requiert des ressources de calcul très importantes.
- Les outils industriels déjà sur le marché entament doucement leur virage HPC (GPGPU)
- Le GPGPU nous semblait incontournable:
  - Pour combler la faiblesse de la méthode GD ;
  - Mais surtout de rester performant dans la durée.
- Problème la compétence au sein d'AxesSim pour la maîtrise de ces nouveaux support d'exécution

# Genèse de la collaboration IRMA / AxesSim (2/2)



- Rencontre avec l'IRMA qui possède les compétences et l'expertise requise pour mener à bien le projet
- Le projet GREAT se structure, la collaboration se met en place de manière progressive :
  - Une personne au centre « un étudiant », une passerelle entre le laboratoire et la PME :
    - ✓ Montage d'un stage (M2)
      - Maxwell, FDTD, découvert du monde de l'industrie
    - ✓ Expérimentation plus poussée avec un CDD (6mois)
      - Montée en compétence GPGPU/OpenCL
      - Résolution d'un Laplace 2D pour la problématique des faisceaux de câbles
  - Début du projet GREAT
    - ✓ Thèse CIFRE en parallèle co-encadré (IRMA - AxesSim)
    - ✓ Équilibre entre recherche et industrialisation.
      - Fiabilité, portabilité avec une recherche de performance

# Le projet GREAT en quelques mots



- Projet GREAT (Jan. 2012 – 36 mois)
- Consortium : ONERA, INRIA, CEA, IRMA et AxesSim(\*)
- Les objectifs : Développer et valider un outil industriel de simulation électromagnétique dans le domaine temporel basé sur une approche GD.
  - En se basant sur les travaux menés par l'ONERA et l'INRIA
  - D'améliorer les performances sur machine de type PC en exploitant les technologies GPGPU émergentes
  - Et de développer un environnement de mise en œuvre (pré – post traitement)
- Les conclusions :
  - L'exploitation des technologies GPGPU nous permet déjà d'avoir un gain supérieur à 10 par rapport à une version CPU.
  - La méthode Maxwell GD est très prometteuse pour traiter des problèmes multi-échelle à géométrie complexe.

# Quelques résultats de GREAT

# Maxwell equations



$$\begin{aligned}\partial_t E - \nabla \times H &= 0, \\ \partial_t H + \nabla \times E &= 0.\end{aligned}$$

- ▶  $E = E(x, t)$ ,  $H = H(x, t) \in \mathbb{R}^3$ : electric and magnetic fields;
- ▶  $x \in \Omega$ , boundary conditions on  $\partial\Omega$ .

More general mathematical formalism

$$W = \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^6.$$

Many physical models take the form:

$$\partial_t W + \partial_i F^i(W) = 0.$$

- ▶  $W = W(x, t) \in \mathbb{R}^m$ : vector of conserved quantities;
- ▶ Sum on repeated indices:  $\partial_i F^i$  means  $\sum_{i=1}^d \partial_i F^i$ ;
- ▶  $F^i(W)$ : flux (contains physics).
- ▶ Maxwell flux is given by ( $n \in \mathbb{R}^3$ )

$$F(W) \cdot n = \begin{pmatrix} -n \times H \cdot n \\ n \times E \cdot n \end{pmatrix}.$$

Applications: electromagnetics, but also fluid mechanics, waves, etc.

# Objectives



- ▶ Build a generic non-linear conservation laws solver optimized for hybrid CPU/GPU clusters.
- ▶ Which programming standard will survive? We bet on OpenCL...

## Outlines:

1. How to use OpenCL? What do we gain?
2. Discontinuous Galerkin (DG) solver based on asynchronous task graph.

# 1) OpenCL



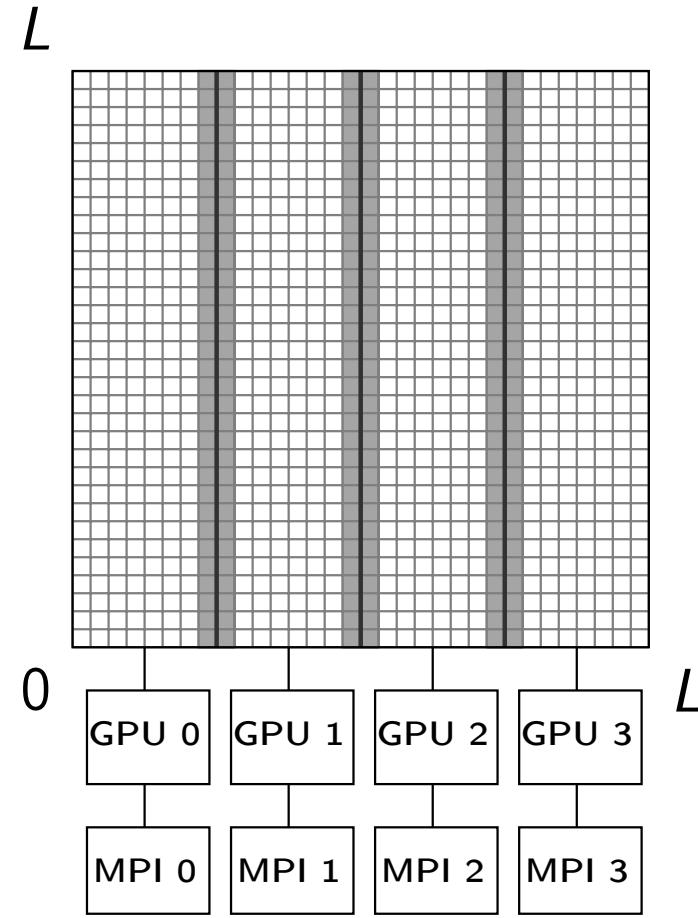
- ▶ OpenCL: “Open Computing Language”. Library of C functions for driving the GPU (or any multicore accelerator).
- ▶ API managed by the Khronos Group (also in charge of OpenGL) <https://www.khronos.org/>
- ▶ Industry standard. Drivers exist for: NVIDIA GPU, AMD CPU and GPU, Intel CPU and GPU Intel, MIC, ARM (CPU+GPU), IBM, etc.

- ▶ OpenCL programming is complex: efficiency requires hand-written cache management.
- ▶ OpenCL programs («kernels») are compiled at runtime: possibilities of **metaprogramming and performance portability**.
- ▶ **OpenCL manages events and a task graph for asynchronous kernel launching.**
- ▶ We can use several GPUs: MPI library for exchanging data between GPUs.

# 2D Finite Difference (FD) solver

Simple 2D FD framework for experimenting multi GPU computations:

- ▶ Subdomain decomposition;
- ▶ Computations inside each subdomain → OpenCL;
- ▶ 1 GPU = 1 subdomain = 1 MPI node;
- ▶ MPI for exchanging data between GPUs (greyed cells layers).



# Kernel code

Example of kernel C code:

```
1 __kernel void flux_balance(int m, float dt_over_dx,
2                             __global float wnow[][_NY][_NX],
3                             __global float wnnext[][_NY][_NX])
4 {
5     int i = get_group_id(0);
6     int j = get_local_id(0);
7
8     float w1[m], w2[m], fR[m], fL[m];
9
10    for(int ii = 0; ii < m; ++ii)
11    {
12        w1[ii] = wnow[ii][i][j];
13        w2[ii] = wnow[ii][i][j+1];
14    }
15
16    numflux(w1,w2,fR);
17
18    for(int ii = 0; ii < m; ++ii)
19        w2[ii] = wnow[ii][i][j-1];
20
21    numflux(w2,w1,fL);
22
23    for(int ii = 0; ii < m; ++ii)
24        wnnext[ii][i][j] -= dt_over_dx * (fR[ii] - fL[ii]);
25 }
```

# Comparisons

Simple 2D Finite Difference (FD) scheme. On large grids we compare:

- ▶ An optimized OpenMP implementation;
- ▶ An OpenCL implementation;
- ▶ An OpenCL+MPI implementation.

Implementation	Time	Speedup
OpenMP (CPU Intel 2x6 cores)	717 s	1
OpenCL (CPU Intel 2x6 cores)	996 s	0.7
OpenCL (NVidia Tesla K20)	45 s	16
OpenCL (AMD Radeon HD 7970)	38 s	19
OpenCL + MPI (4 x NVIDIA K20)	12 s	58

Essential: optimized memory access...

## 2) Unstructured grid

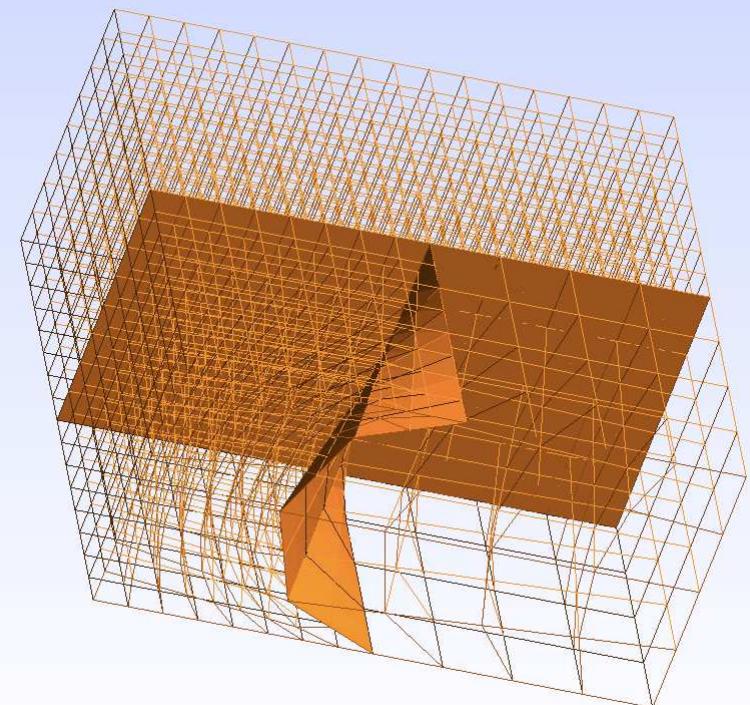


- ▶ Unstructured hexahedrons mesh for representing complex geometries.
- ▶ Subdomain decomposition. 1 domain = 1 MPI node = 1 OpenCL device.
- ▶ Zone decomposition. Each subdomain is split into volume zones and interface zones.
- ▶ Non-conformity between zones is allowed.

# Mesh example

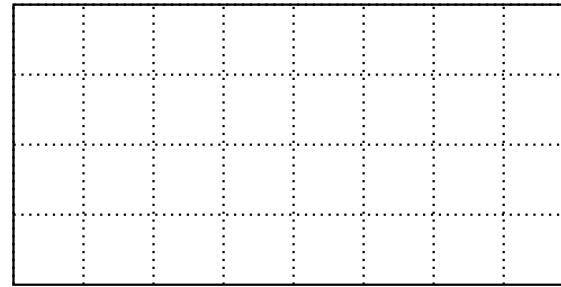
A non-conforming mesh with two subdomains, three volume zones and three interface zones.

- ▶ Subdomain 1: only one big refined volume zone. Two interface zones.
- ▶ Subdomain 2: two small volume zones (coarse and refined). Three interface zones.

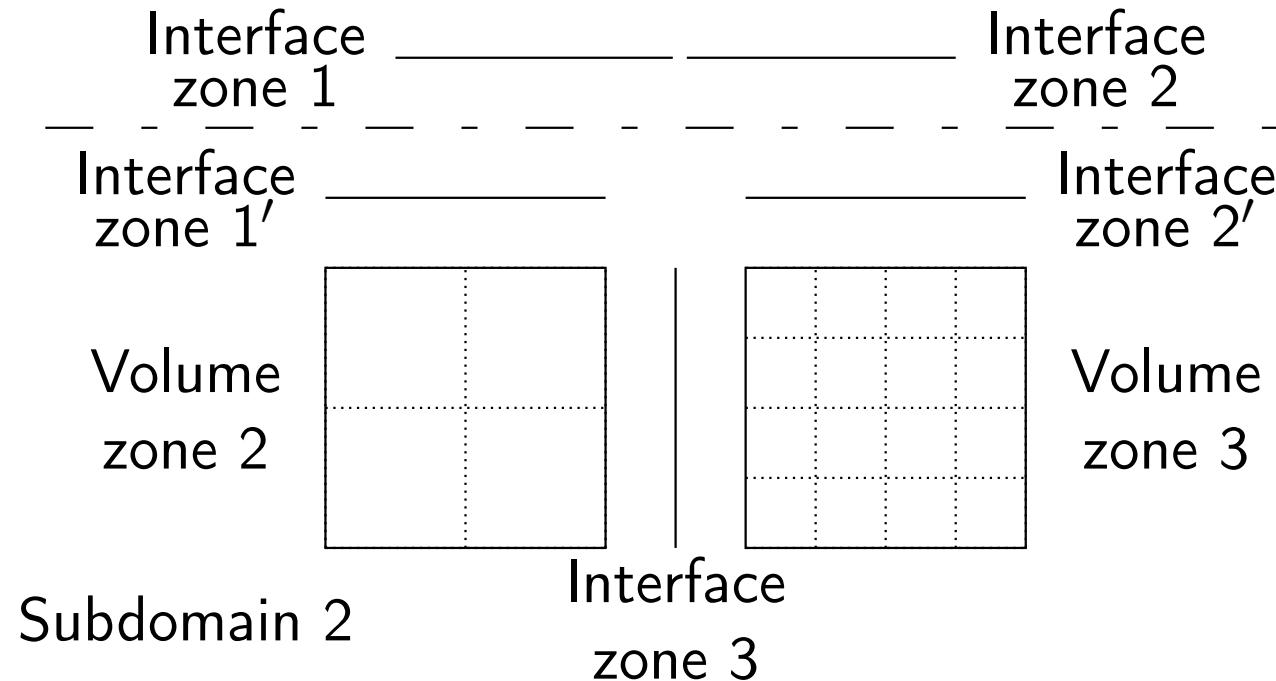


# Mesh structure

Subdomain 1



Volume  
zone 1

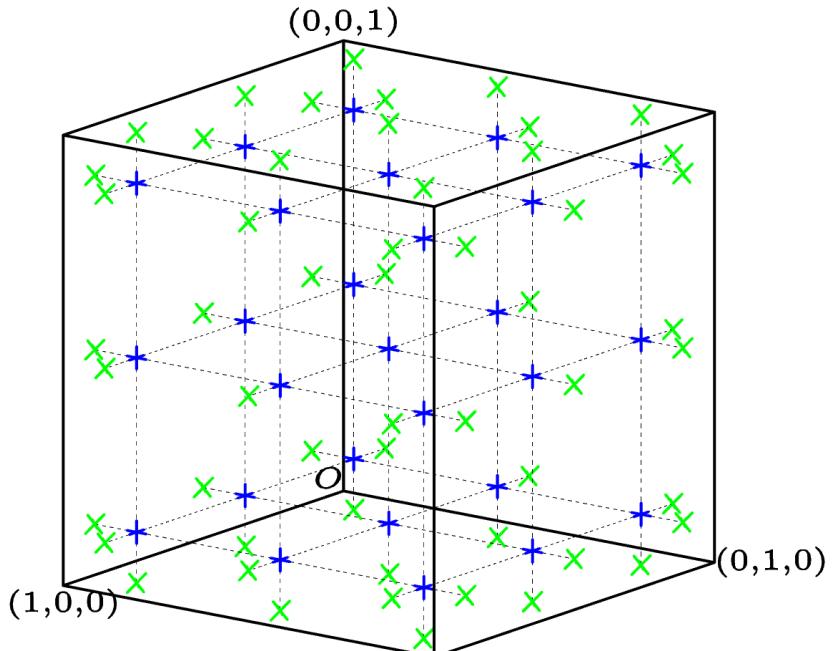


# Discontinuous Galerkin (DG) approximation

Generalization of the FD method: DG method in a 3D space.  
In each cell  $L$  of the mesh, the conserved quantities are expanded  
on Lagrange polynomial basis functions

$$W(x, t) = W_L^j(t) \psi_j^L(x), \quad x \in L.$$

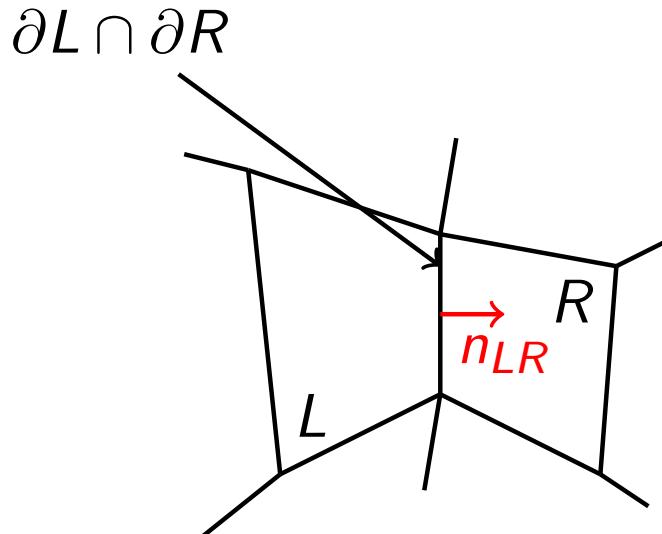
- ▶  $L$  is a (possibly stretched) hexahedron
- ▶  $W$  is determined by its values at blue volume Gauss points
- ▶  $W$  is discontinuous at green faces Gauss points.



The numerical solution satisfies the DG approximation scheme

$$\forall L, \forall i \quad \int_L \partial_t W_L \psi_i^L - \int_L F(W_L, W_L, \nabla \psi_i^L) + \int_{\partial L} F(W_L, W_R, n_{LR}) \psi_i^L = 0.$$

- ▶  $R$  denotes the neighbor cells along  $\partial L$ .
- ▶  $n_{LR}$  is the unit normal vector on  $\partial L$  oriented from  $L$  to  $R$ .
- ▶  $F(W_L, W_R, n)$ : numerical flux.
- ▶  $F(W, W, n) = F^k(W)n_k$ .



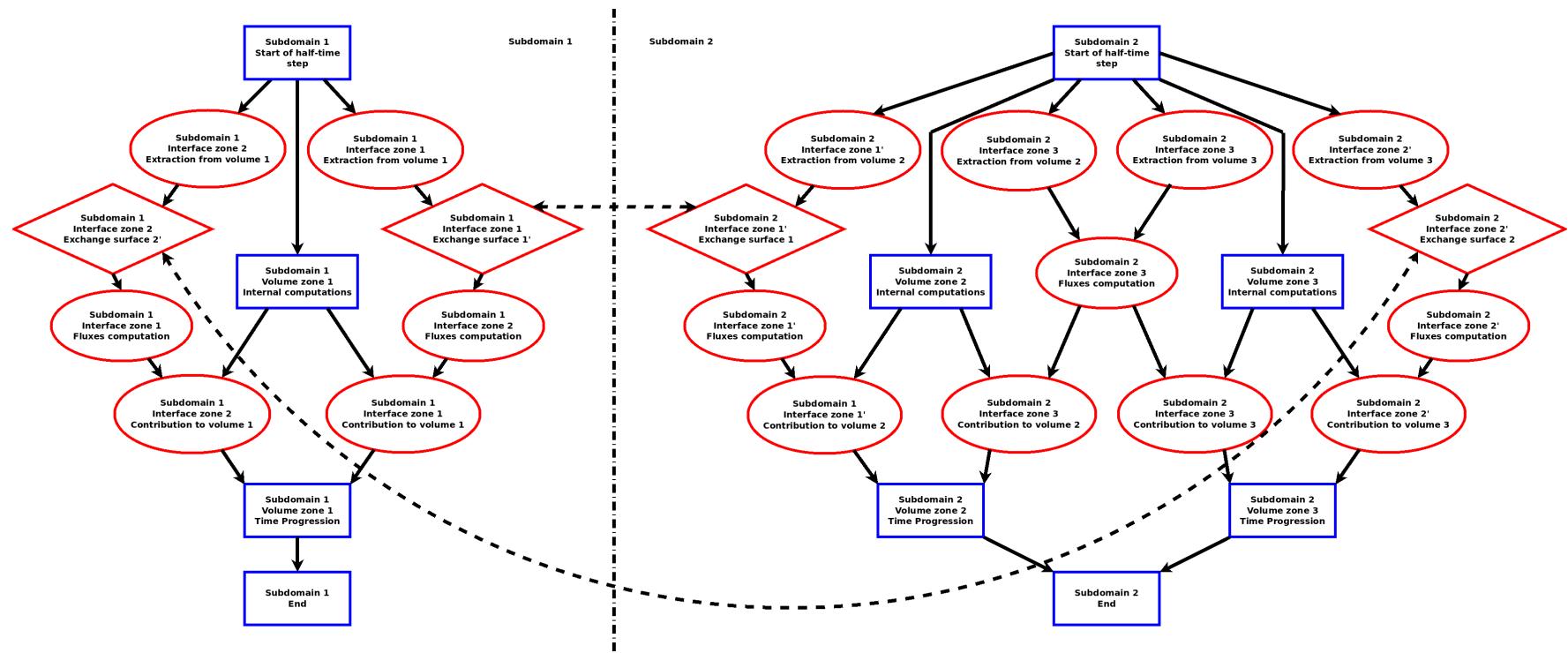
Time integration of a system of ordinary differential equations.

- ▶ Elementary tasks attached to volume or interface zones.
- ▶ A task is associated to a computational OpenCL kernel or to memory operations (GPU↔CPU and MPI transfers).
- ▶ The optimized design of the computational kernels is much more tricky than for the FD method...
  - ▶ Hexahedra mesh optimizations ( $(D + 1)^3 \rightarrow 3(D + 1)$  complexity).
  - ▶ Idling work-item strategy for avoiding cache misses.
  - ▶ Our FLOPS are good FLOPS !
- ▶ Asynchronous task launch based on OpenCL events: overlap data transfers with computations.
- ▶ Work in progress: more sophisticated task runtime (StarPU), local time-stepping, etc.

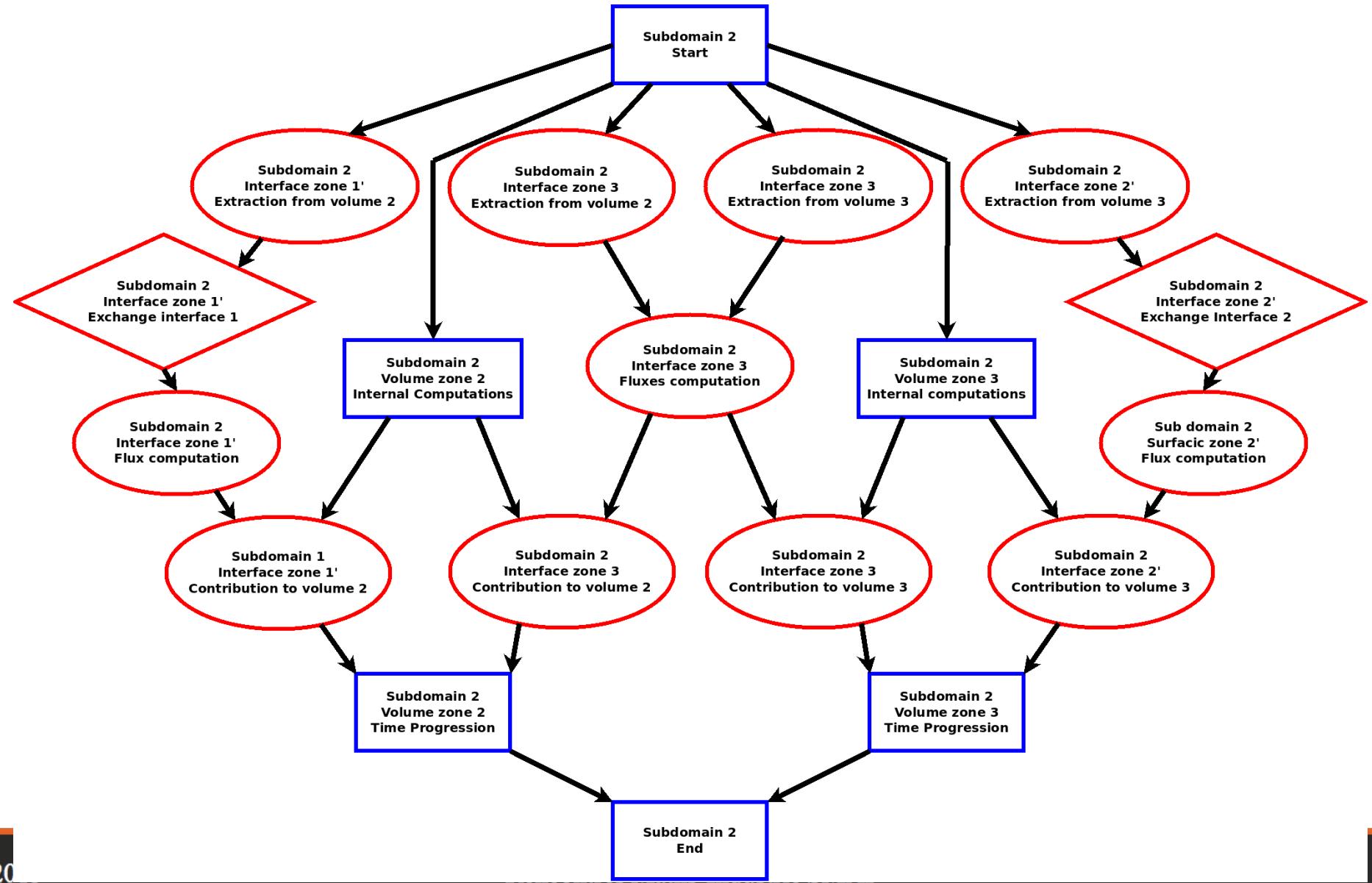
# Tasks

Name	Attached to	Description
Extraction	Interface	Copy or extrapolate the values of $W$ from a neighboring volume zone
Exchange	Interface	GPU/Host transfers and MPI communication with an interface of another domain
Fluxes	Interface	Compute the fluxes at the Gauss points of the interface
Sources	Volume	Compute the internal fluxes and source terms inside a volume zone
Boundaries	Interface	Apply the fluxes of an interface to a volume zone
Time	Volume	Apply a step of the Runge-Kutta time integration to a volume zone
Start	Volume	Fictitious task: beginning of the Runge-Kutta substep
End	Volume	Fictitious task: end of the Runge-Kutta substep

# Tasks graph: two domains



## Tasks graph: one domain



# Sync./Async. comparison



Big mesh, polynomial order  $D = 3$ , NVIDIA K20 GPUs, infiniband network.

		1 GPU	2 GPUs	4 GPUs	8 GPUs
Sync.	TFLOPS/s	1.01	1.84	3.53	5.07
ASync.	TFLOPS/s	1.01	1.94	3.74	7.26

We achieve  $\simeq 30\%$  of the peak performance.

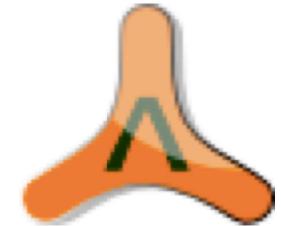
Nota: 7 TFLOP/s was the peak performance of the most powerful American supercomputer in 2002...

# Évaluation des performances



- Il est difficile de déterminer une équivalence entre un CPU et un GPU
- On se base sur un critère empirique : le coût du matériel
  
- Architectures retenues :
  - Intel Xeon 6 cœurs, 12 threads (# 300 €)
  - Nvidia GeForce GTX 780 (# 350 €)
  - AMD Radeon R 9200 (# 300 €)
  
- Les calculs sont effectués avec FemGD (code de recherche) sur un cœur de CPU Intel Xeon puis le temps de calcul sur 12 cœurs est estimé en appliquant la règle  $T_{12} = (1 + a) T_1 / 12$  avec  $a$  compris entre 0 et 0.2.
  
- Les calculs sont effectués avec Teta (code industriel) sur une carte graphique (Nvidia ou AMD).

# Résultats : temps de calcul

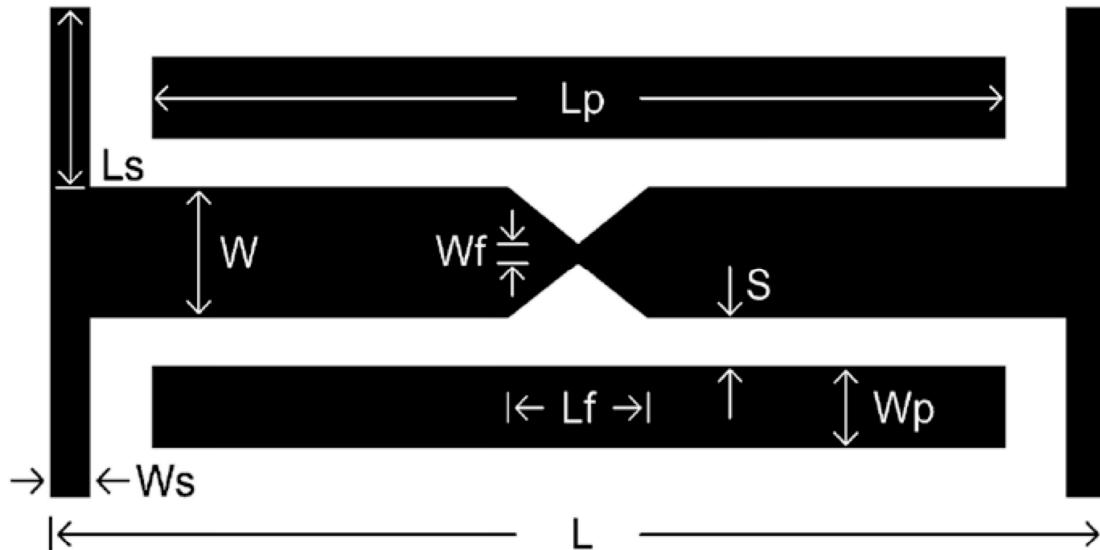
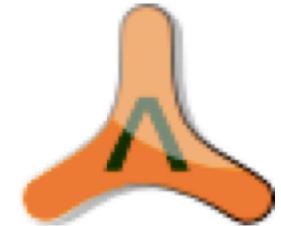


- Temps de calcul obtenus pour trois cas tests :

	Injection d'un champ incident	Plaque métallique	Plaque mince conductrice
FemGD ( $a=0$ )	500s	562s	626s
FemGD ( $a=0.2$ )	600s	678s	751s
Teta (Nvidia)	54s	59,3s	50,3s
Teta (AMD)	51,7s	59,8s	44,8s

- Cela conduit à une accélération d'un facteur entre 9 et 15

# Expérience d'une antenne

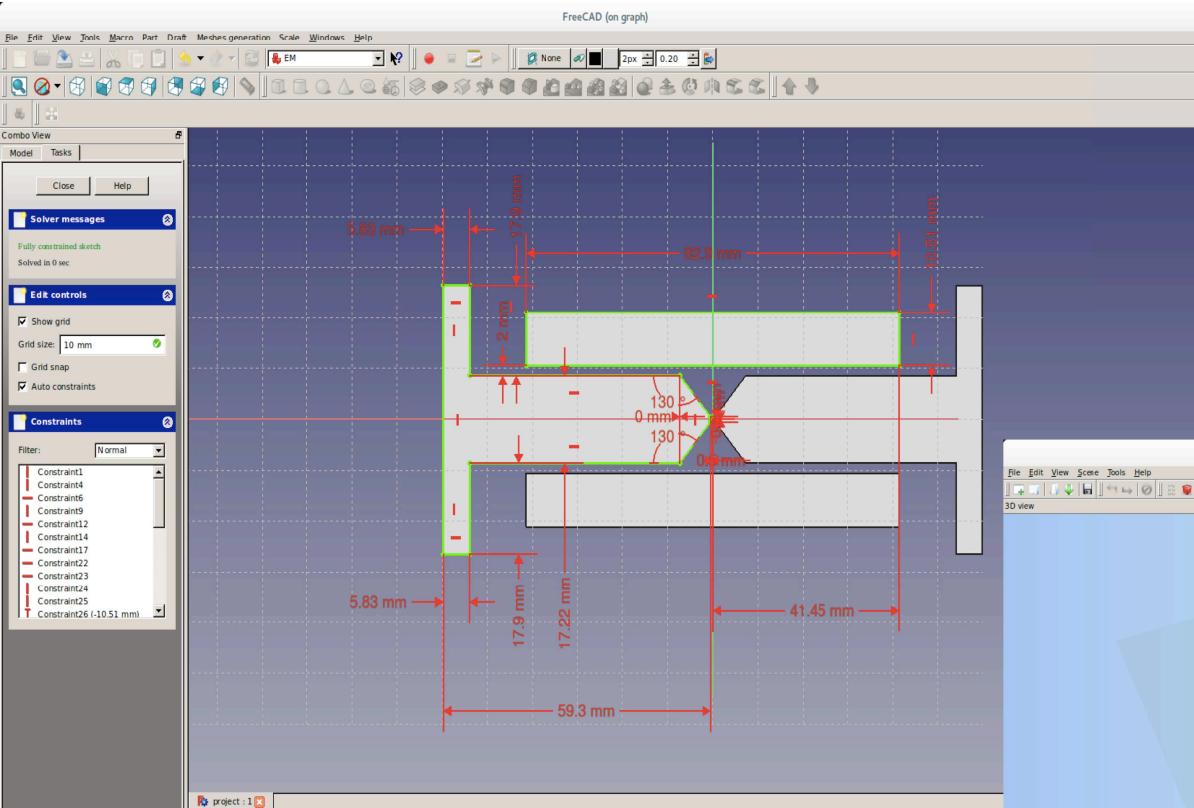


longueur	61
épaisseur	21
aligneur	91
étagéeur	85
émisseur	98
récepteur	50
éloignement	2
électrité	32
épaisseur	53
étagéante	20

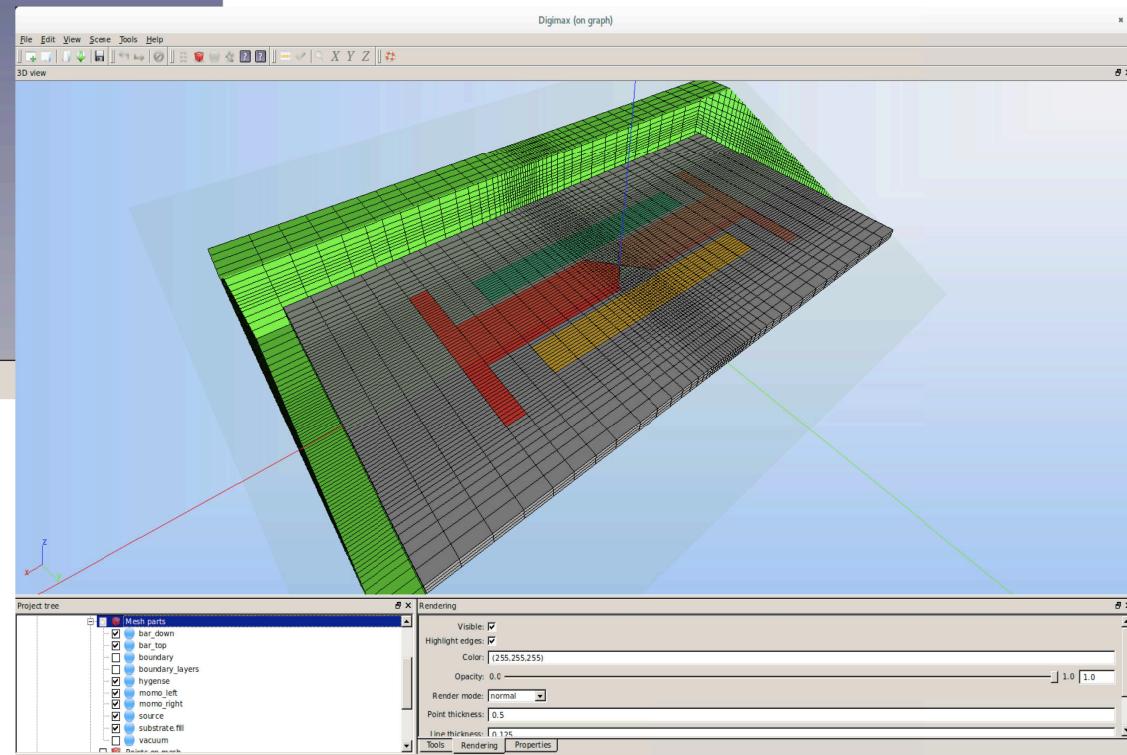
- Dipôle patch de type ELPOSD
- Elle est composée de:
  - deux branches faisant une longueur totale  $L$  et chargées aux extrémités par des charges (brins verticaux de longueur  $L_s$  et d'épaisseur  $W_s$ )
  - deux éléments parasites (ligne horizontale de longueur  $L_p$  et d'épaisseur  $W_p$ )
- Les arêtes inclinées forment un angle de 45 degrés avec les bras du dipôle
- Cette antenne est imprimée sur un substrat de 180 x 90 x 3.175 mm
- Diélectrique de permittivité 2.33 S/m

Spence, T.G.; Werner, D.H., "A Novel Miniature Broadband/Multiband Antenna Based on an End-Loaded Planar Open-Sleeve Dipole," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol.54, no.12, pp.3614,3620, Dec. 2006

# Environnement de Maillage

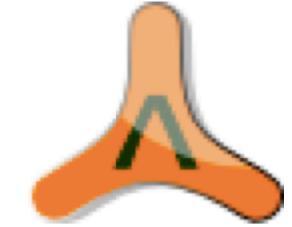


CAO avec FreeCAD

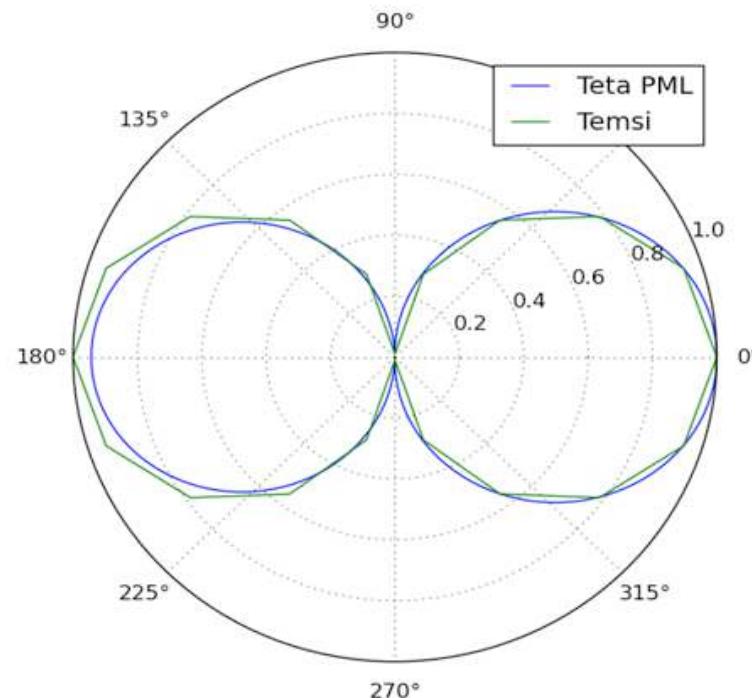


Maillage en hexaèdre dans DiGimax

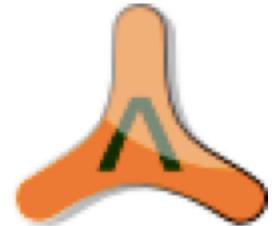
# Résultat numérique



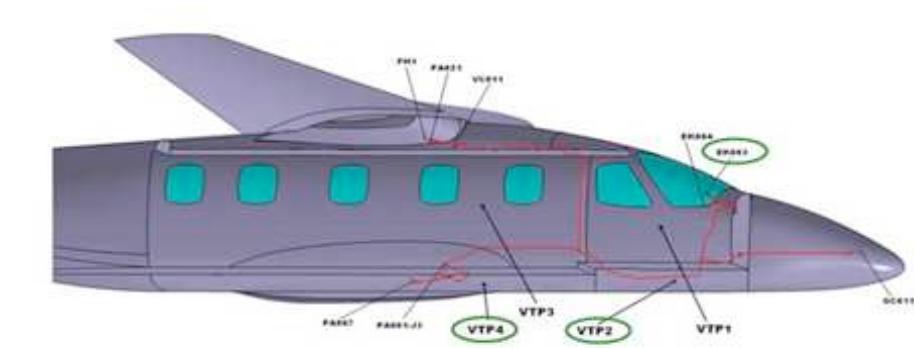
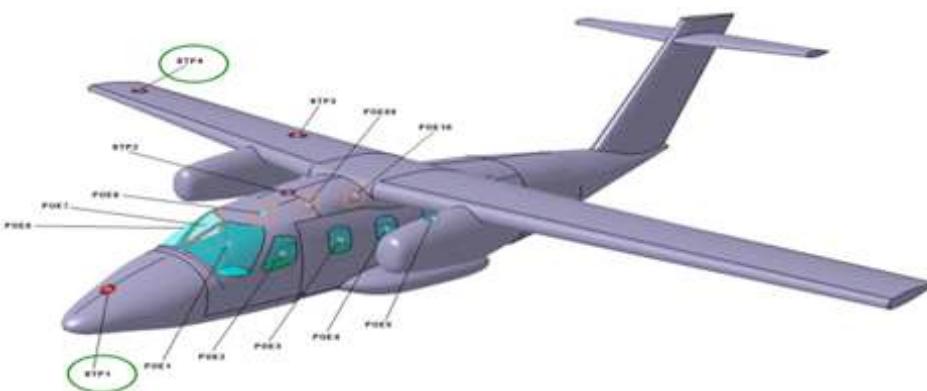
- Diagramme de rayonnement en champ lointain  $E(\theta)(\phi=0)$  à la fréquence de 0.6GHz



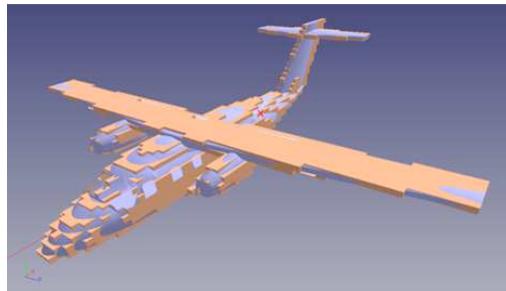
# Test de scalabilité MPI



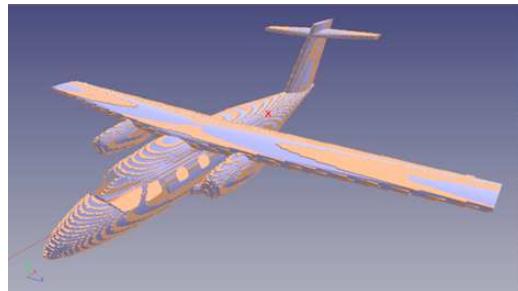
- Déclinaison du cas NTC1 (Evektor EV55 avion de transport régional) du projet HIRF SE
- Résolution multi GPU 2-4-8



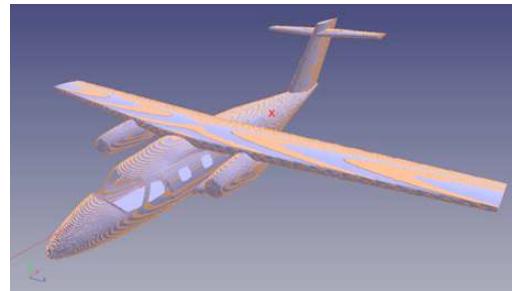
# Résultats en champ



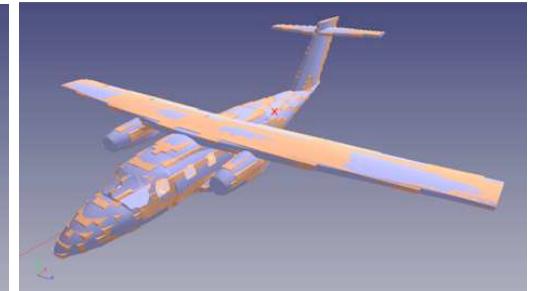
FDTD 20cm



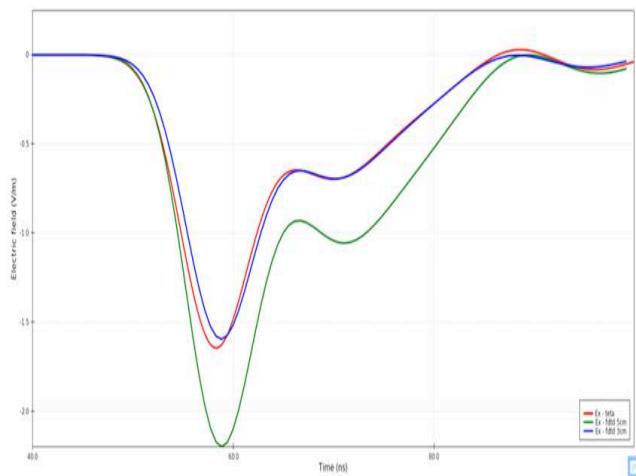
FDTD 5cm



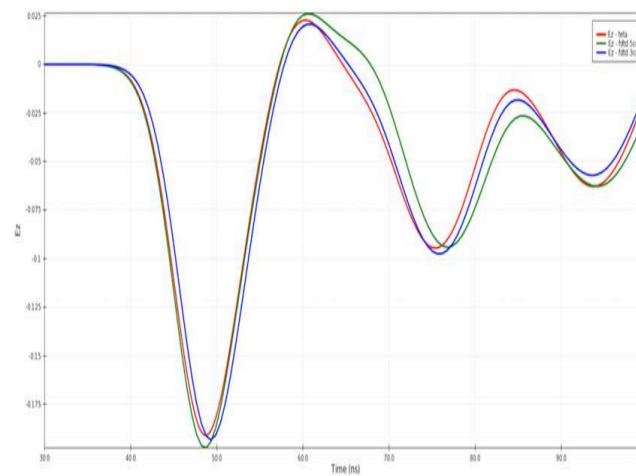
FDTD 3cm



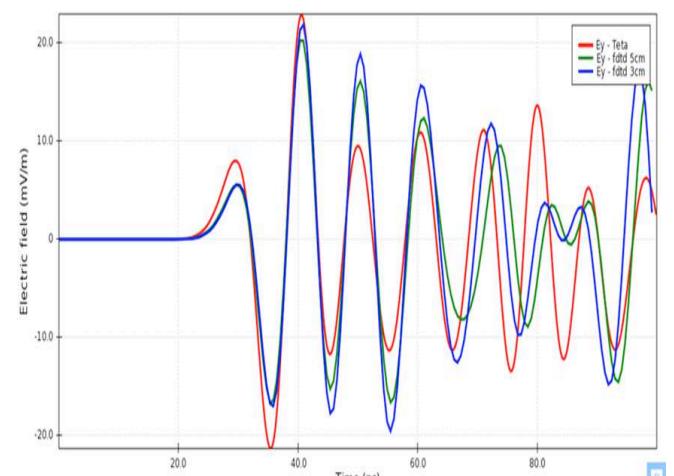
GD 20cm



Nez



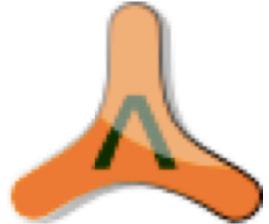
Dérive



Habitacle

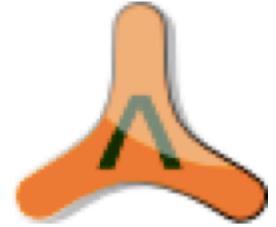
# Les enjeux de demain

# Le Quantified Self



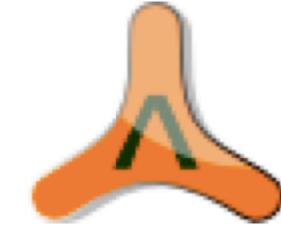
- Aujourd'hui tous les acteurs économiques cherchent à se placer sur le marché des objets connectés, considéré comme la nouvelle révolution industrielle.
- Les objets connectés en chiffres :
  - 56 millions d'objets connectés à porter sur soi d'ici 2018 [IHS POWER & ENERGY]
  - 31 milliards d'objets connectés à horizon 2020 [Projection INTEL]
- Objets connectés et santé :
  - 500 millions d'utilisateurs de smartphones utiliseront des applications liées à la santé d'ici 2015 [research2Guidance]
  - 50 % des seniors seraient prêts à utiliser les objets connectés si leur médecin le leur proposait [DMD santé]
- « **Quantified Self** » est un segment porteur

# Un segment ouvert au PME

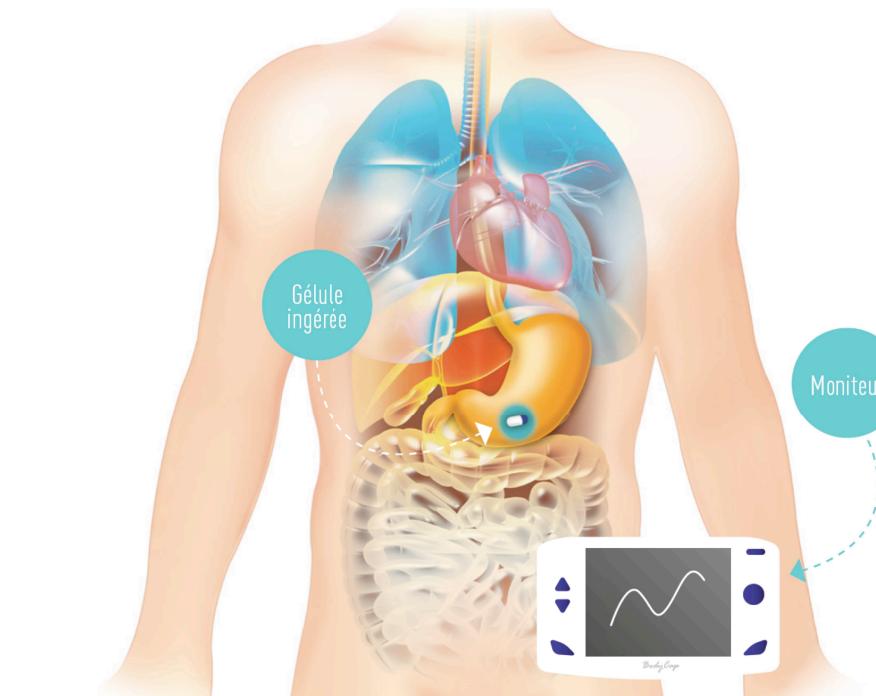


- Nous ne comptons plus le nombre d'entreprises qui développent des objets connectés.
  - Grands groupes : Google, Samsung, Apple
  - Et une constellation de Start up et PME
- La France est bien placée dans cette course à l'innovation avec déjà des leaders mondiaux et de vrais pépites.
- Deux exemples partenaires CITYZENS SCIENCES – BODY CAP

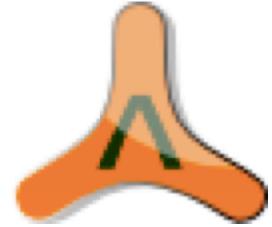
# Deux exemples concrets



- CITYZENS SCIENCES spécialisée dans la création et la conception de textiles connectés.
- Impact du positionnement de l'émetteur sur l'autonomie
- Respect des normes DAS
- BODY CAP développe l'Instrumentation médicale de demain (e-Celsius®).
- Optimisation de la communication
- Respect des normes médicales

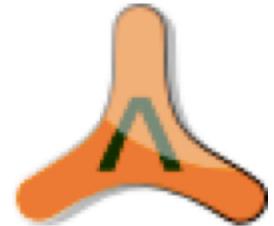


# Le GD/HPC au service des PME



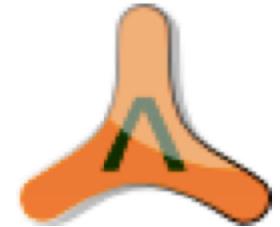
- Nous avons l'ambition de proposer une solution de calcul numérique permettant de concevoir et d'optimiser des objets connectés proche du corps humain (on body - in body).
- L'optimisation du placement d'antenne dans un environnement aussi complexe et multi-échelle que le corps humain nécessite des ressources de calcul importantes et un environnement spécifique.
- L'appel à projet « Cœur de filière numérique - Calcul intensif et simulation numérique » est une formidable opportunité pour nous positionner rapidement sur ce segment.

# Projet HOROCH

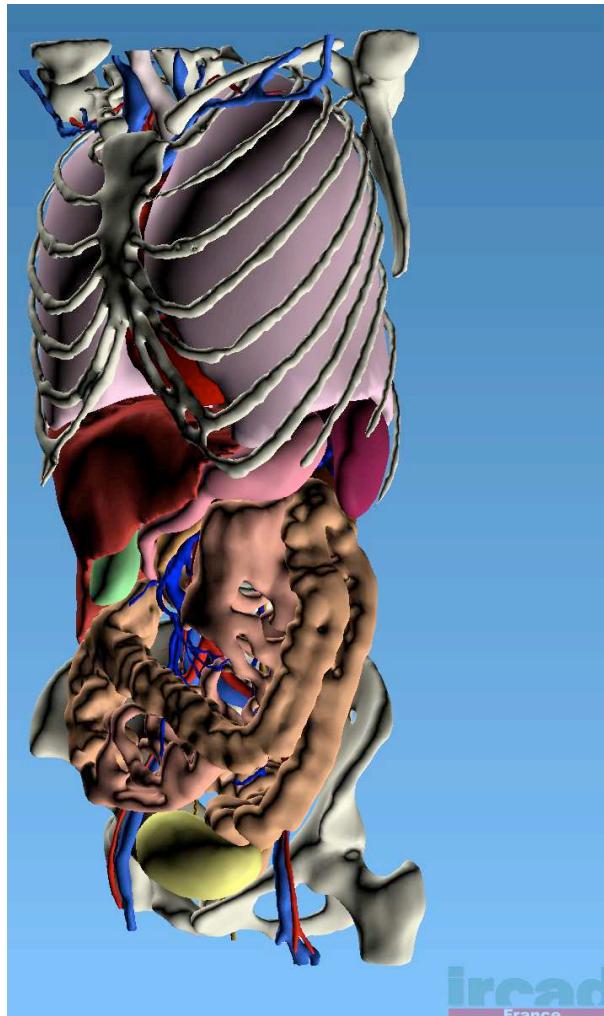


- Projet HOROCH (Jan. 2015 – 36 mois)
- Consortium : ONERA, Thales(\*), Cityzens Sciences, Body Cap, IRMA et AxesSim (IRCAD)
- Les objectifs :
  - Optimisation de la méthode GD/OpenCL pour adresser le HPC
  - Construction d'une base de données orientée EM autour du corps humain
  - Adaptation de l'environnement aux contraintes de la modélisation du corps humain
  - Réflexion autour de l'étude numérique sur une population entière
- A la fin du projet AxesSim pourra proposer une offre pour startup et PME :
  - GD/HPC
  - Disponible dans le Cloud via CuToo
- Réfléchir à de nouveaux services (web) autour des ondes et du corps humain

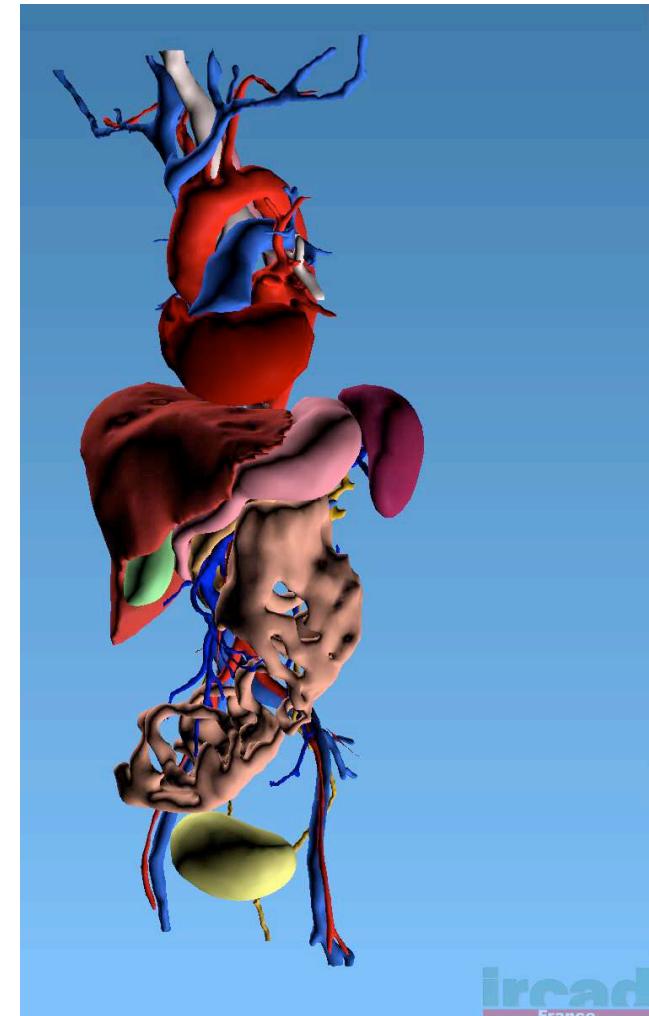
# Des outils au service de l'innovation



ircad  
France



ircad  
France



ircad  
France

# Conclusion

Collaboration fructueuse pour AxesSim :

- Expérience GPU de l'IRMA (essuyer les plâtres...)
- Tests technologies émergentes
- Conception de codes génériques
- Certains aspects maths : stabilité, convergence des schémas par exemple.

Mais aussi pour l'IRMA !

- Nouveaux défis : multi-échelle, couplages (fils/Maxwell par exemple), etc.
- Financement de thèses CIFRE.
- Etudiants : formation théorique avec débouchés appliqués.
- Source d'idées et de problèmes mathématiques intéressants.