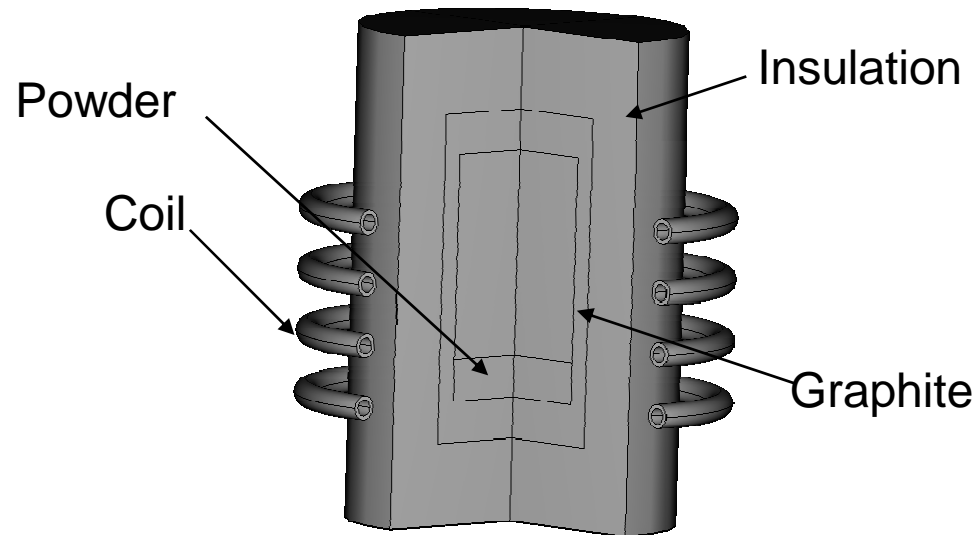


Crystal growth set-up for Microelectronic process

Jean-Marc Dedulle (iris.dedulle@wanadoo.fr) : IRIS Technologies

Control of geometry + control of power supply
= control of thermal gradient



Induction heating modeling
of crystal growth set-up

Induction heating model with v4.0

Geometric Model : Hypothesis

- 2D cylindrical geometry to obtain optimize coil
- For induction heating model 2D axi

Physical Model : induction heating

- Electromagnetic
- Quasi-static approximation ($\sigma \gg \epsilon\omega$) in 2D axi
- Thermal radiation with ambient and in cavity in 2D axi

Numerical model : strong coupling

- Vector potential formulation - complex unknown
- Temperature formulation - non linear problem ($T^4, \sigma(T)$) in 3D
- Radiative flux with view factor

Coil Design

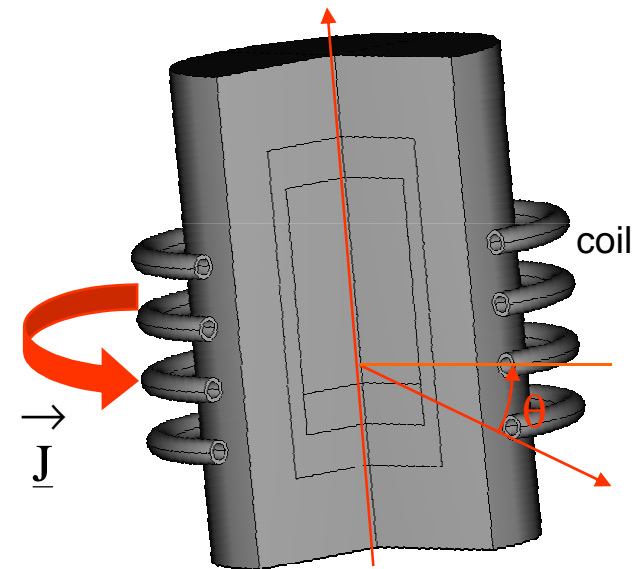
Mathematical model : Partial derivative equation

$$\underline{\underline{A}} / \underline{\underline{B}} = \text{rot } \underline{\underline{A}} \left(\text{flux conservation : } \text{div } \underline{\underline{B}} = 0 \right)$$

$$\text{rot} \left(\text{rot } \underline{\underline{A}} \right) + j\mu_0\sigma(T)\omega \underline{\underline{A}} = \mu_0\sigma(T) \text{grad } \underline{\underline{V}}$$

2D cylindrical geometry

$$\underline{\underline{J}} = \begin{pmatrix} 0 \\ \underline{\underline{J}}_{\theta}(r,z) \\ 0 \end{pmatrix}$$



Coil Design

In order to design coil we needed losses in the copper
Voltage supply and computation of eddy currents in coil

$$\vec{J}_{\text{total}} = -j\sigma(T)\omega\vec{A} + \sigma(T)\text{grad}\vec{V}$$

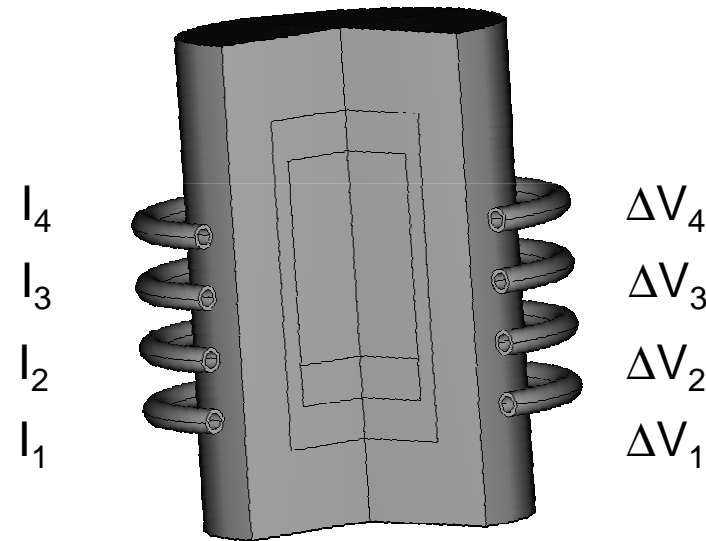
Turn coil are in a serial electric scheme :

$$I_1 = I_2 \dots$$

ddp per turn coil imposed : DV_i

Constraint for an integral property :

$$I_i = \int_S \vec{J}_{\text{total}_i} \cdot d\vec{S}_i$$



Adjustement of DV_i , in order to respect constraint

Physical properties

Pi Paramètres

Paramètres

Nom	Expression	Valeur	Description
sigma_isolation	2e3[S/m]	2000 S/m	
sigma_poudre	1e4[S/m]	10000.0 S/m	
I0	300[A]	300 A	
k_isolation	1	1	
k_graphite	10	10	
k_poudre	25	25	
FREQ	50000[Hz]	50000.0 Hz	

Frequency=50kHz

Propriétés de sortie

Propriété	Variable	Expression	Unité	T
Conductivité électrique	{sig...a33}	sigma_graphite	S/m	3x
Perméabilité relative	{mu...33}	1	1	3x
Permittivité relative	{eps...33}	0	1	3x



Expression:

Entrées du modèle

Quantité physique	Variable
Température	T



Paramètres locaux

Paramètre	Expression	Unité
sigma_graphite	$70000/(0.375+0.00035*T+144.7/T)$	

$$\sigma_{\text{graphite}} = \frac{7 \cdot 10^4}{3.5 \cdot 10^{-4} T + 0.375 + \frac{144.7}{T}} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Constraint for an integral property

Single turn domain

four_v4.0.mph (root)

- Définitions globales
 - Paramètres
- Modèle 1 (mod1)
 - Définitions
 - Géométrie 1
 - Matériaux
 - Champs magnétiques (emqa)
 - Théorème d'Ampère 1
 - Axisymétrie 1
 - Isolation magnétique 1
 - Valeurs initiales 1
 - Domaine bobine monospire 1**
 - Domaine bobine monospire 2
 - Domaine bobine monospire 3
 - Domaine bobine monospire 4
 - Transfert de chaleur (htgh)
 - Maillage 1
- Etude 1
- Résultats

Domaine bobine monospire

Domaines

Sélection: spire_1

6

Domaine bobine monospire

Nom bobine: 1

Excitation bobine: Courant

Courant bobine: I_{coil} 10 A

$$\vec{I}_i = \int_S \vec{J}_{\text{total}_i} \cdot d\vec{S}_i$$

$$\vec{J}_{\text{total}} = -j\sigma(T)\omega \underline{\underline{A}} + \sigma(T) \text{grad } \underline{\underline{V}}$$

Single turn domain

ddp per turn coil computed automatically : $\text{grad}V_i$

Automatically add to dependent variables :

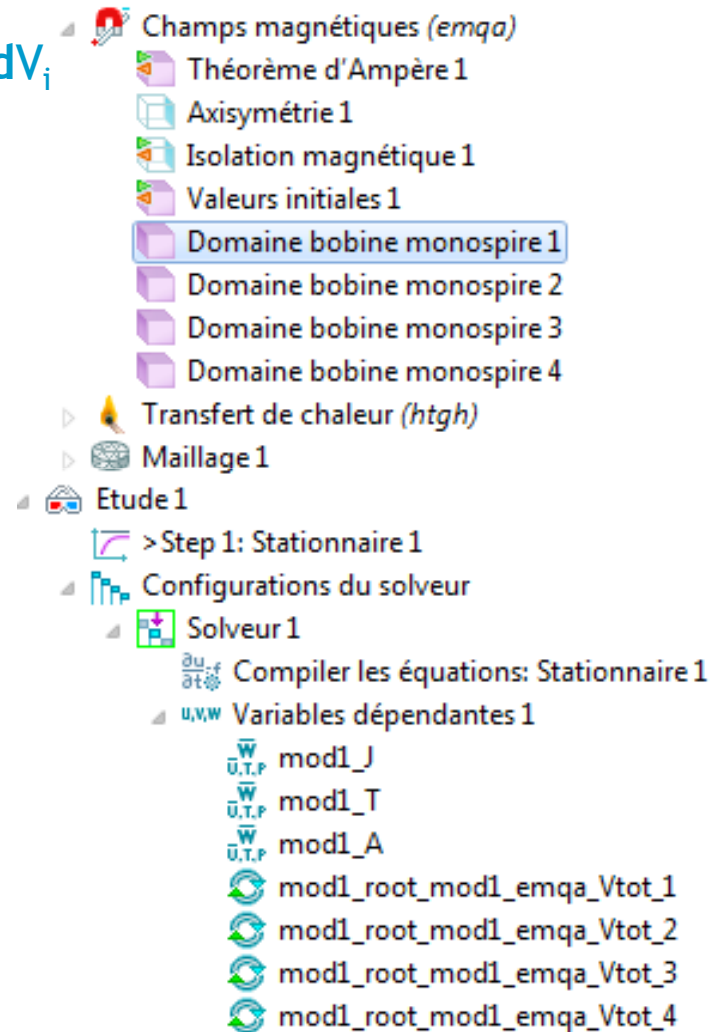
emqa.Vtot_1

emqa.Vtot_2

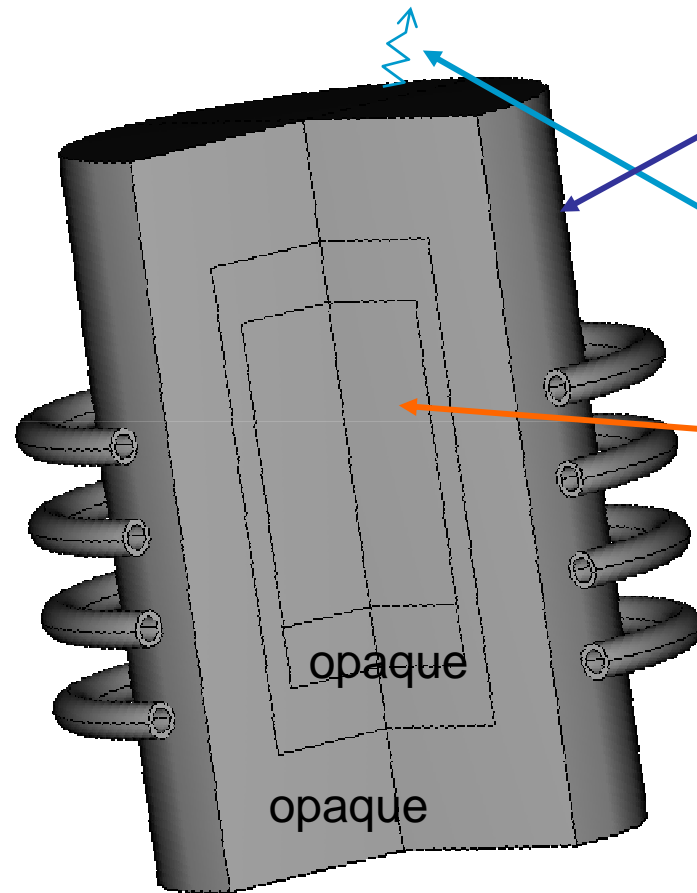
emqa.Vtot_3

emqa.Vtot_4

Adjustment of emqa.Vtot_i, in order to respect constraint I_0



Radiation flux in cavity



• **Boundary conditions**

$$T = 80^\circ\text{C}$$

• **Boundary conditions**

$$-\vec{k} \text{grad } T \cdot \vec{n} = h (T - T_{\text{amb}}) + \sigma_s \varepsilon (T^4 - T_{\text{amb}}^4)$$

• **Radiation flux in cavity**

$$-\vec{k} \text{grad } T \cdot \vec{n} = h (T - T_{\text{amb}}) + \phi_{\text{radiatif}}$$

Non linear system to solve :

$$\sum_j \left[\frac{(\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_j) \cdot F_{ij})}{\varepsilon_j} \right] \phi_j = \sum_j (\delta_{ij} - F_{ij}) \cdot \sigma_s \cdot T_j^4$$

$$\text{View factor : } F_{ij} = \frac{1}{\pi S_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{d_{ij}^2} dS_i dS_j$$

Radiation flux in cavity

The image shows the COMSOL Multiphysics interface for a heat transfer model. The central tree view shows the model structure, with 'Rayonnement de surface à surface 1' highlighted in red. The left panel shows the 'Transfert de chaleur' settings, including the 'Modèle physique' section where 'Rayonnement de surface à surface' is checked. The right panel shows the 'Rayonnement de surface à surface' settings, with 'Direction du rayonnement' set to 'Controlée par l'opacité'. A red arrow points from the 'Rayonnement de surface à surface 1' node in the tree to the 'Direction du rayonnement' dropdown in the right panel. The 'Frontières' section in the right panel lists boundary IDs 10, 12, and 19. The 'Paramètre du rayonnement' section shows 'Température ambiante' set to T . The 'Emissivité de surface' section shows the emissivity set to 0.9.

Transfert de chaleur

Identifiant d'interface
Identifiant: htgh

Domaines
Sélection: Manuel
2
3
4
5

Modèle physique
Modèle par défaut:
Transfert de chaleur dans les solides
 Rayonnement de surface à surface
 Transfert de chaleur en milieu poreux

Paramètre du rayonnement
Méthode de rayonnement de surface-à-surface:
Hémicube
Résolution du rayonnement:
256
Secteurs azimutaux:
128

four_v4.0.mph (root)
Définitions globales
Pi Paramètres
Modèle 1 (mod1)
Définitions
Géométrie 1
Matériaux
Champs magnétiques (emqa)
Transfert de chaleur (htgh)
Transfert de chaleur dans les solides 1
Axisymétrie 1
Isolation thermique 1
Valeurs initiales 1
Transfert de chaleur dans les solides 2
Opaque 1
Transfert de chaleur dans les solides 3
Opaque 1
Transfert de chaleur dans les solides 4
Opaque 1
Source de chaleur 1
Isolation thermique 2
Température 1
Flux de chaleur 1
Rayonnement de surface à ambient 1
Rayonnement de surface à surface 1
Maillage 1
Etude 1
> Step 1: Stationnaire 1
Configurations du solveur
Solveur 1
Compiler les équations: Stationnaire 1
Variables dépendantes 1

opaque

Rayonnement de surface à surface
Frontières
Sélection: Manuel
10
12
19

Entrées du modèle
Température:
T Température (htgh/solid1)

Paramètre du rayonnement
Direction du rayonnement:
Controlée par l'opacité
Température ambiante:
T_{amb} T K

Emissivité de surface
Emissivité de surface:
c Défini par l'utilisateur
0.9 1

Mesh

**Caution to mesh :
Skin effect are very
important in copper**

Taille

Etendue géométrique

Niveau géométrique:

Sélection:

3

Taille de l'élément

Prédéfini

Personnalisé

Paramètres de taille d'élément

Taille d'élément maximale:

Taille

Etendue géométrique

Niveau géométrique:

Sélection:

6
7
8
9

Taille de l'élément

Prédéfini

Personnalisé

Paramètres de taille d'élément

Taille d'élément maximale:

Solve

Etape ségrégée

Général

Variables:

```
mod1_J
mod1_T
mod1_A
mod1_root_mod1_emqa_Vtot_1
mod1_root_mod1_emqa_Vtot_2
```

Composantes: Manuel

Sélection:

```
mod1.Aphi
mod1.emqa.Vtot_1
mod1.emqa.Vtot_2
mod1.emqa.Vtot_3
mod1.emqa.Vtot_4
```

Solveur linéaire: Direct 1

Etude 1

- > Step 1: Stationnaire 1
 - Configurations du solveur
 - Solveur 1
 - Compiler les équations: Stationnaire 1
 - Variables dépendantes 1
 - Solveur stationnaire 1
 - Direct
 - Couplage fort
 - Avancé
 - Ségréé 1
 - Etape ségrégée
 - Etape ségrégée 1**
 - Etape ségrégée 2
 - Direct 1
 - Direct 2
 - Configurations de job

Etape ségrégée

Général

Variables:

```
mod1_J
mod1_T
mod1_A
mod1_root_mod1_emqa_Vtot_1
mod1_root_mod1_emqa_Vtot_2
```

Composantes: Manuel

Sélection:

```
mod1.J
mod1.T
```

Solveur linéaire: Direct 2

Electromagnetism

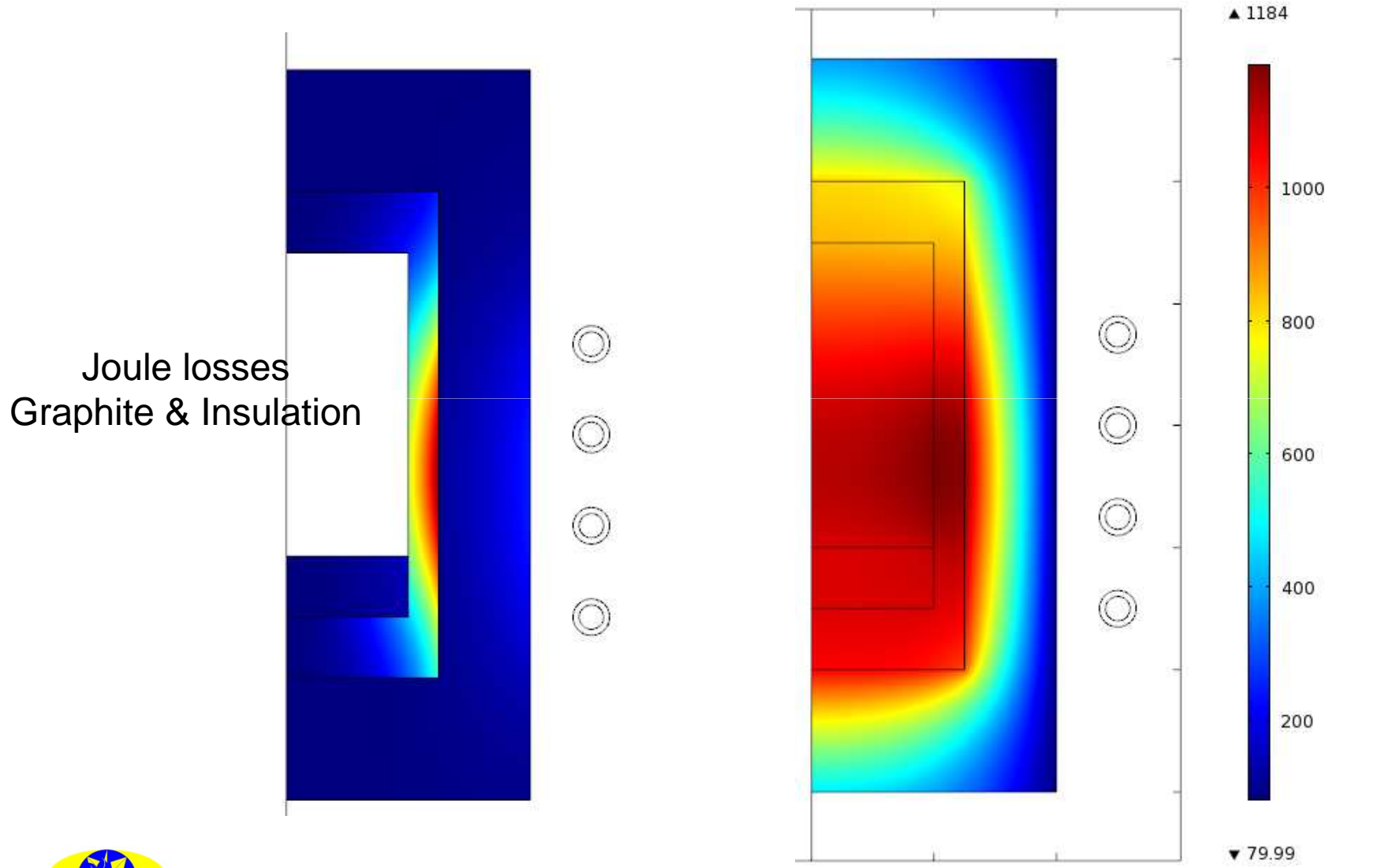


IRIS Technologies

Heat transfer



Post-processing



Exercise → Compute electrical parameters : R and L

Post-processing 3D

