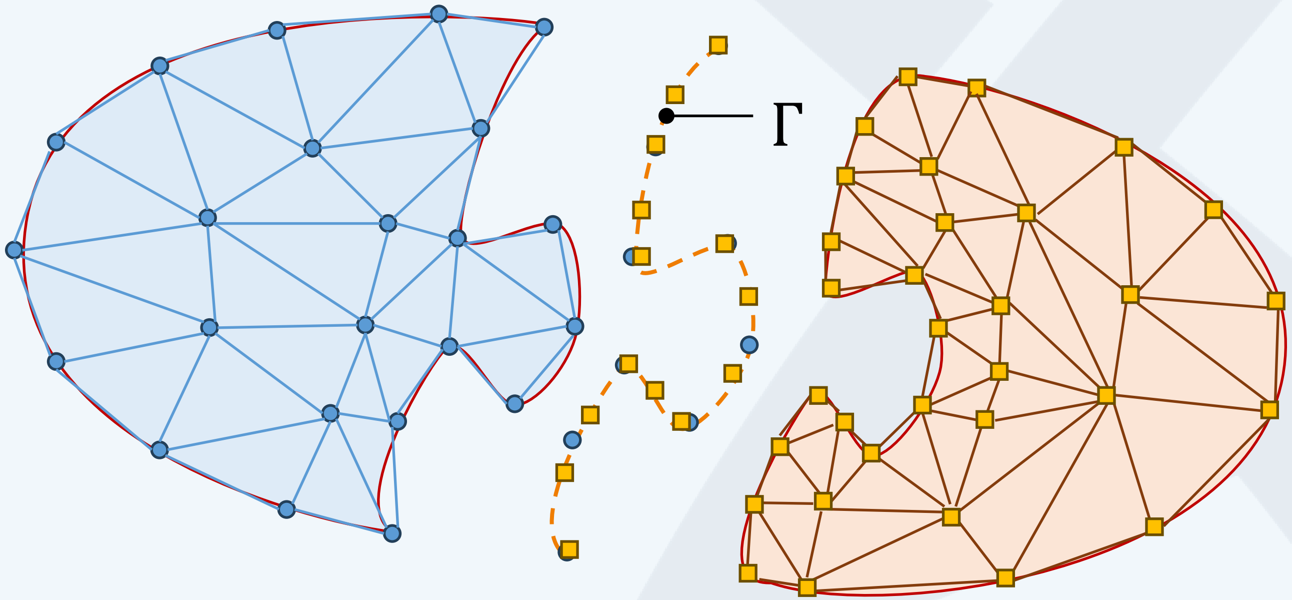
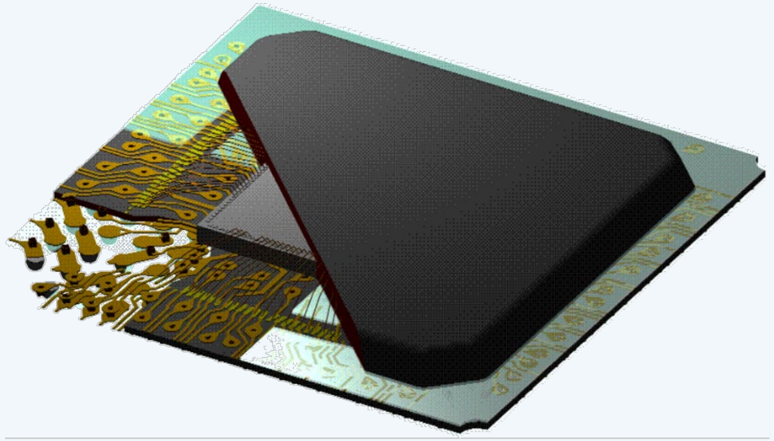
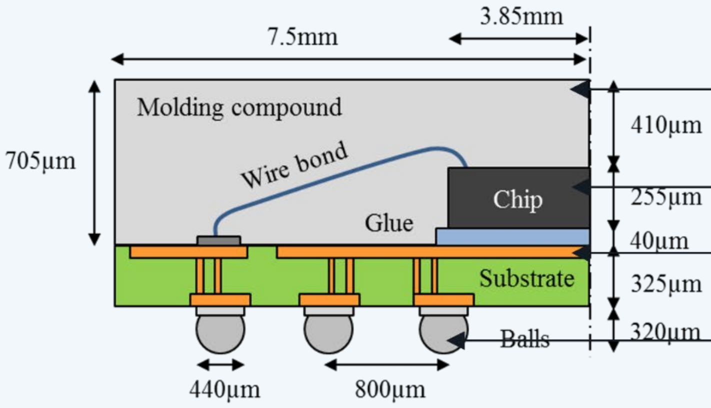
Sous-structuration modale



Frédéric Joly

Problématique : BGA 208



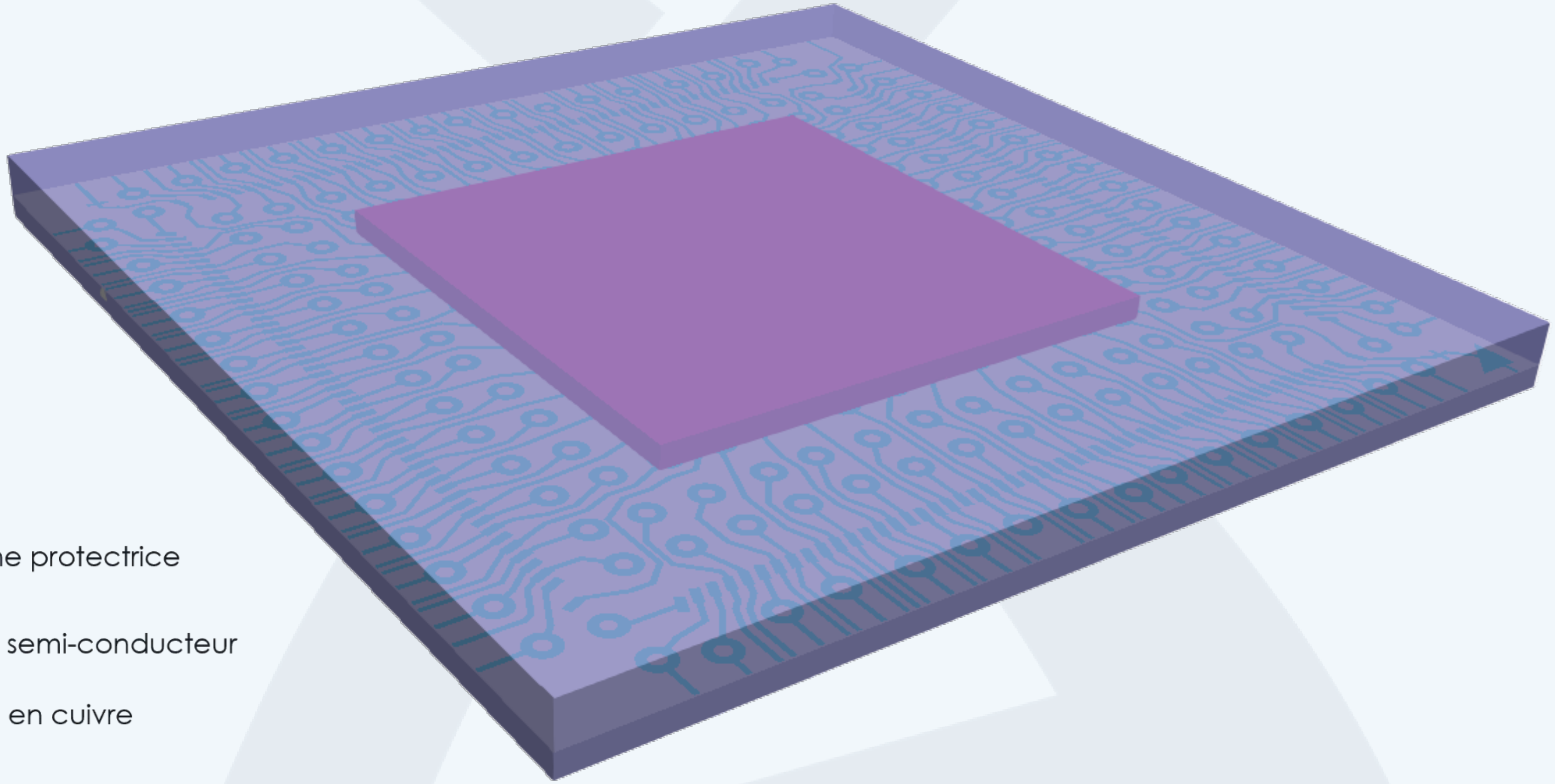


Résine protectrice

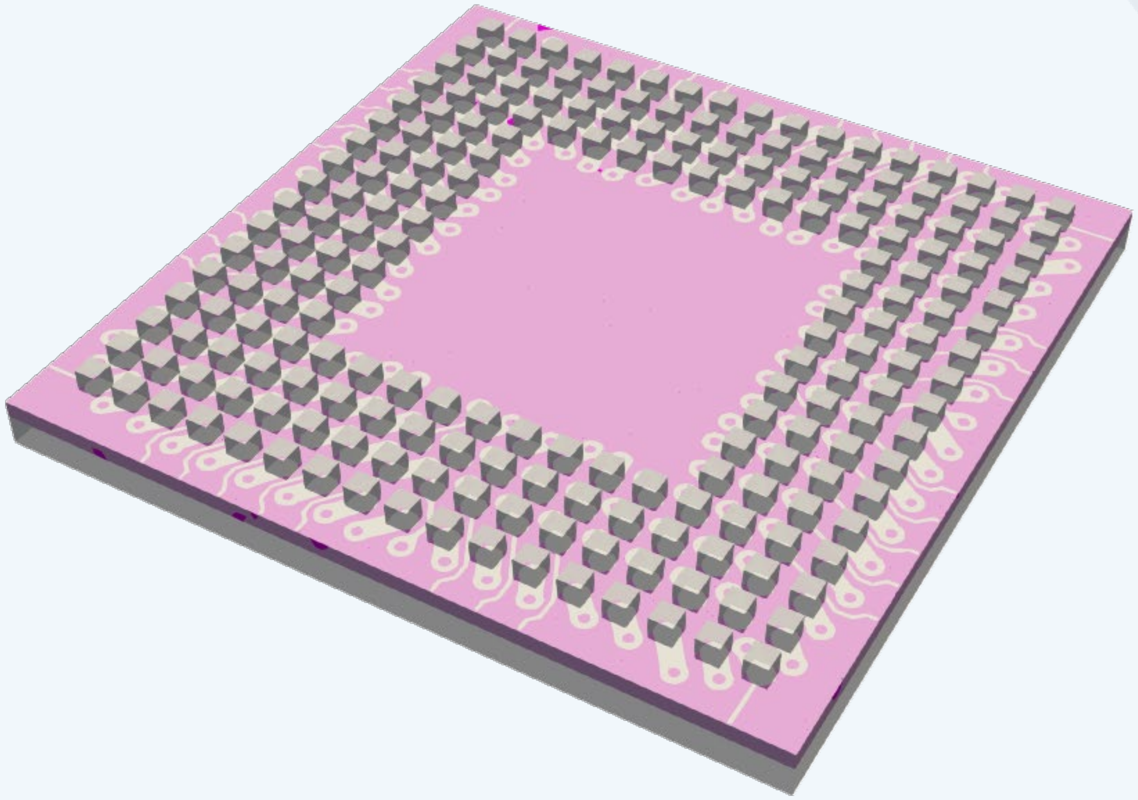
Puce semi-conducteur

Pistes en cuivre

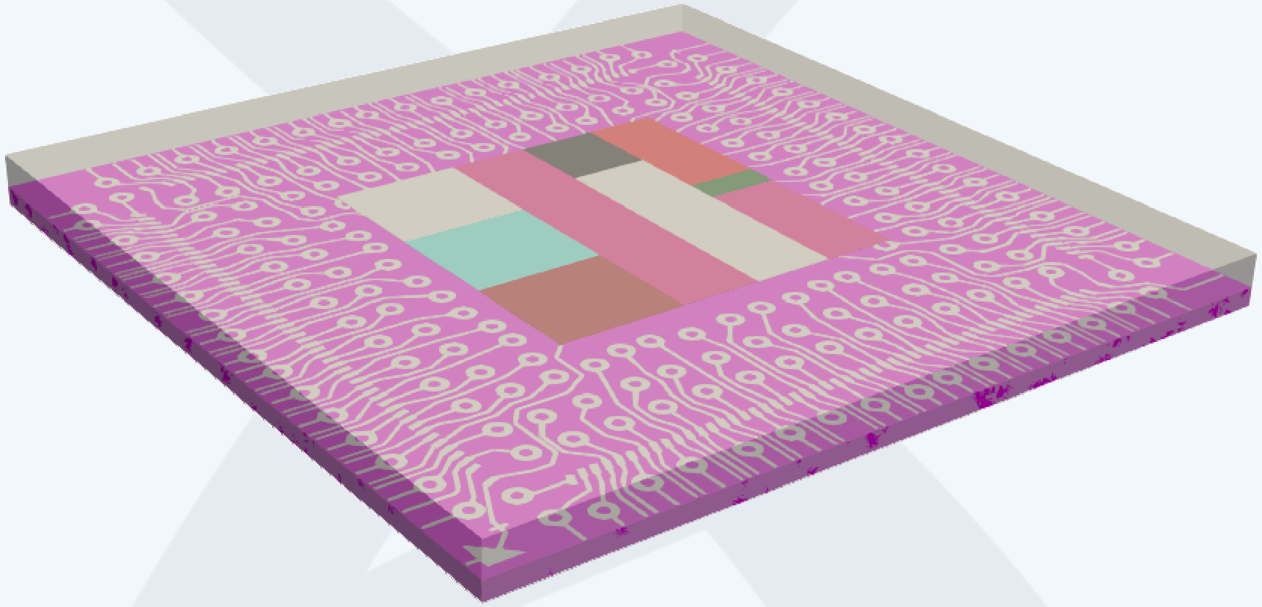
Connection à la carte via des billes



Problématique : BGA 208

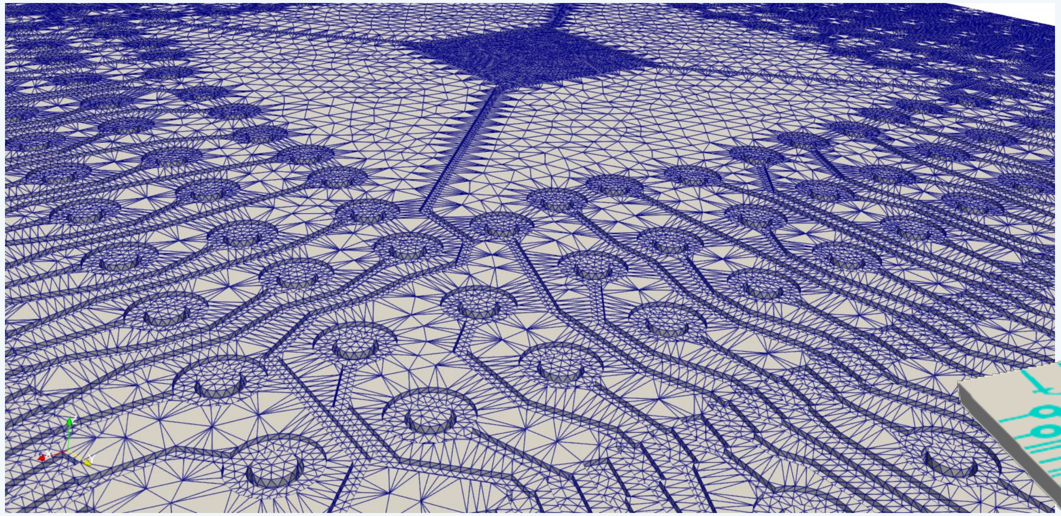


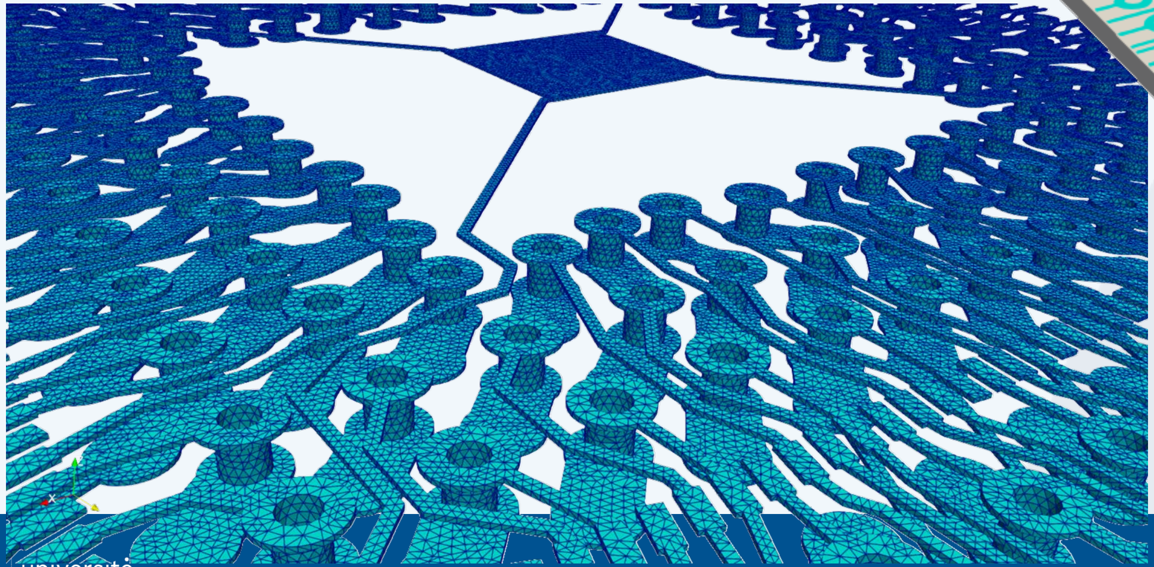
Vue de dessous

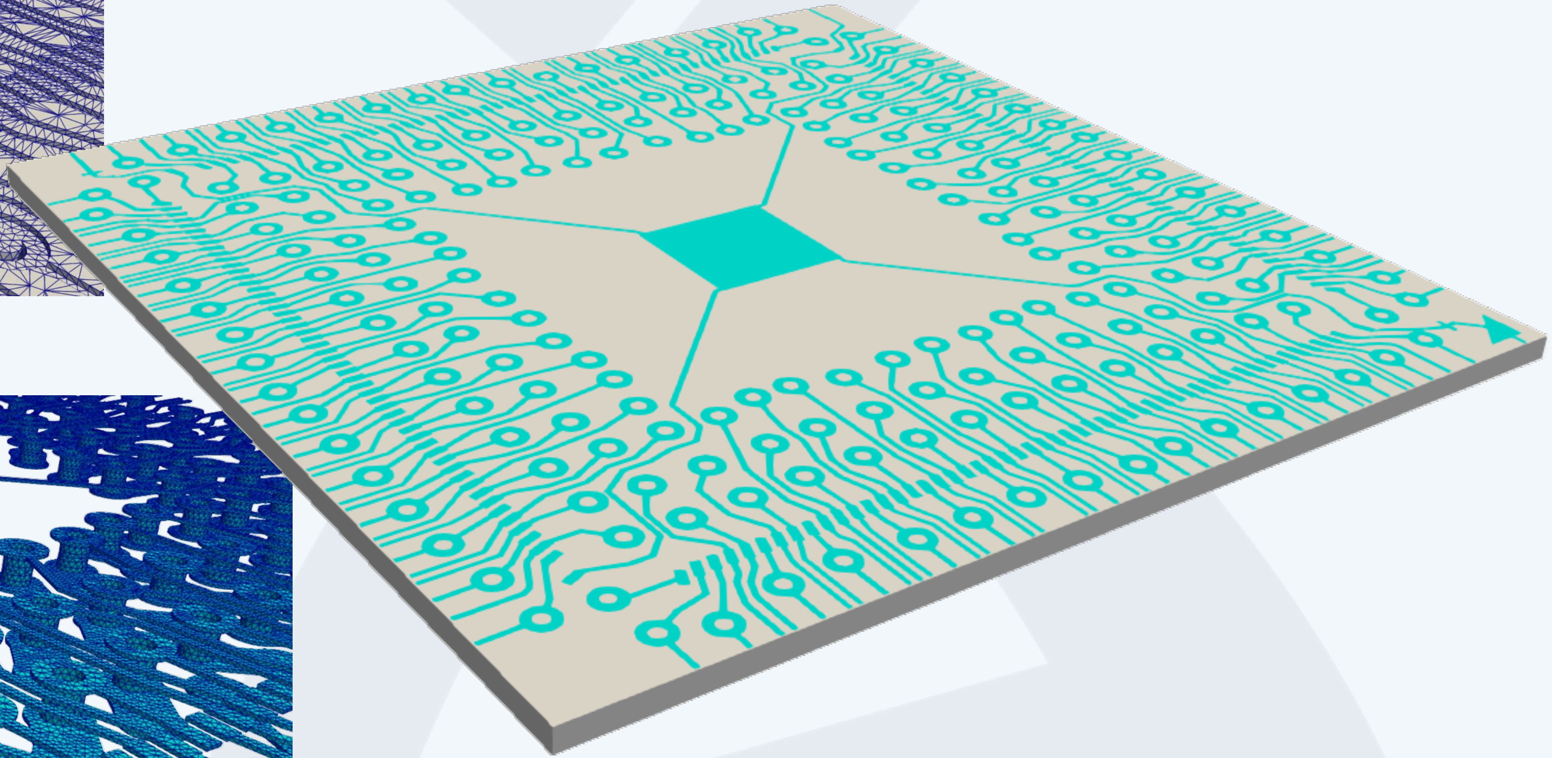


Vue de dessus

Problématique : BGA 208

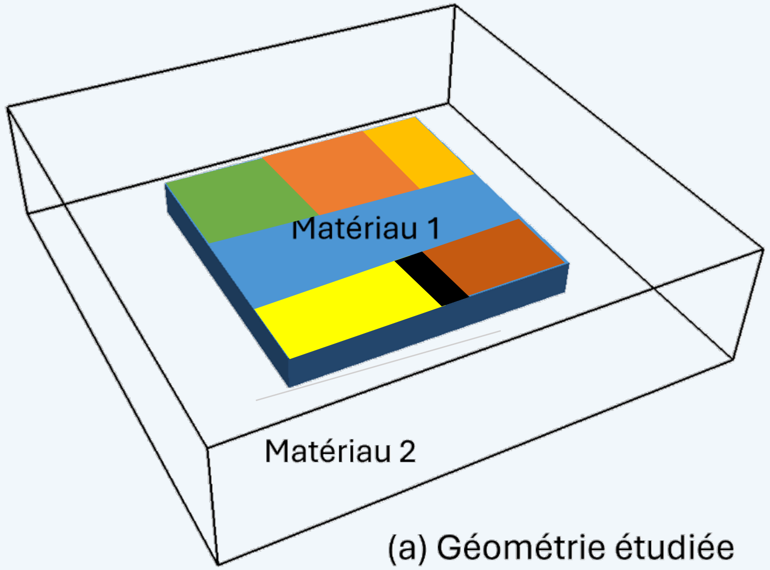




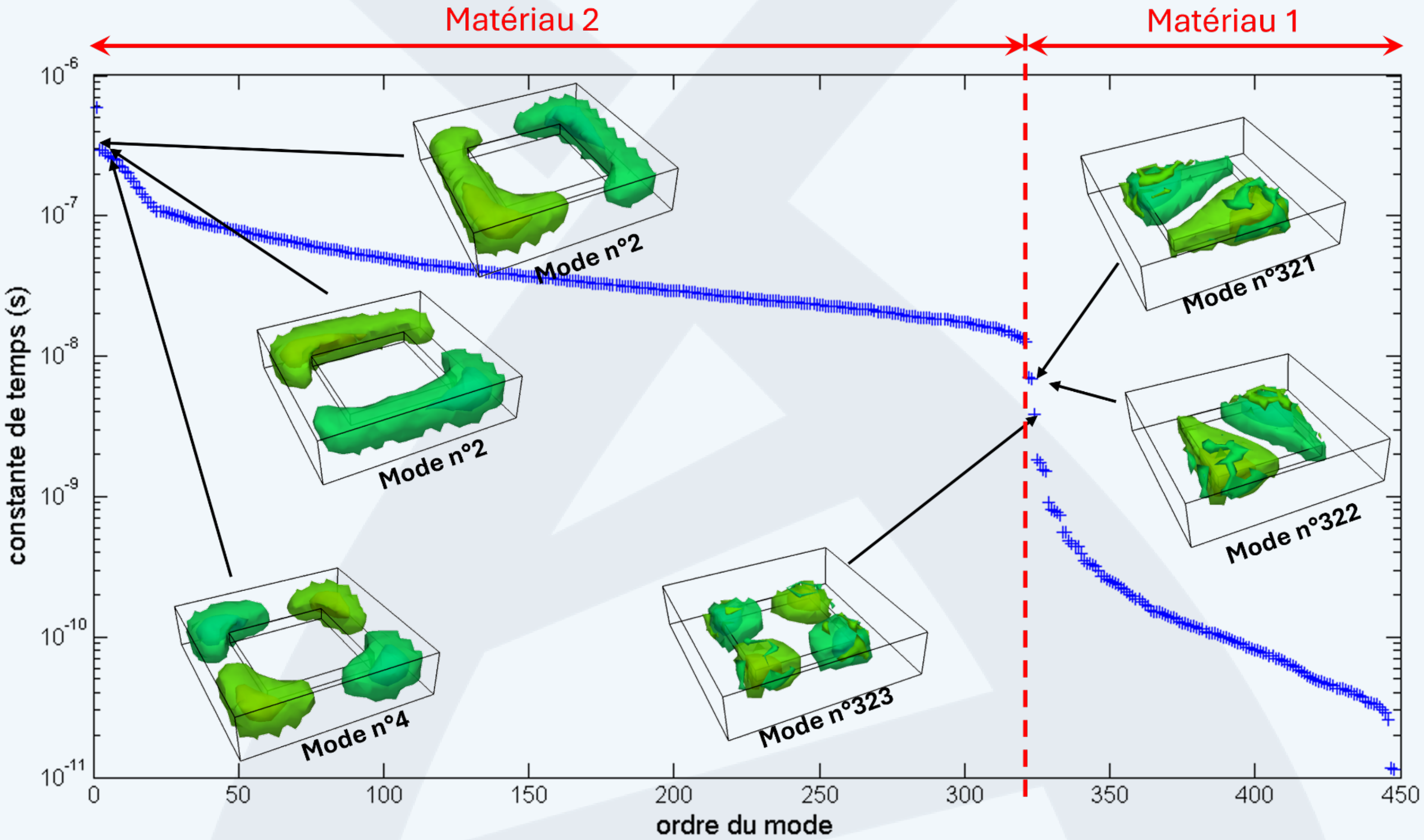


Environ 600 k degrés de liberté

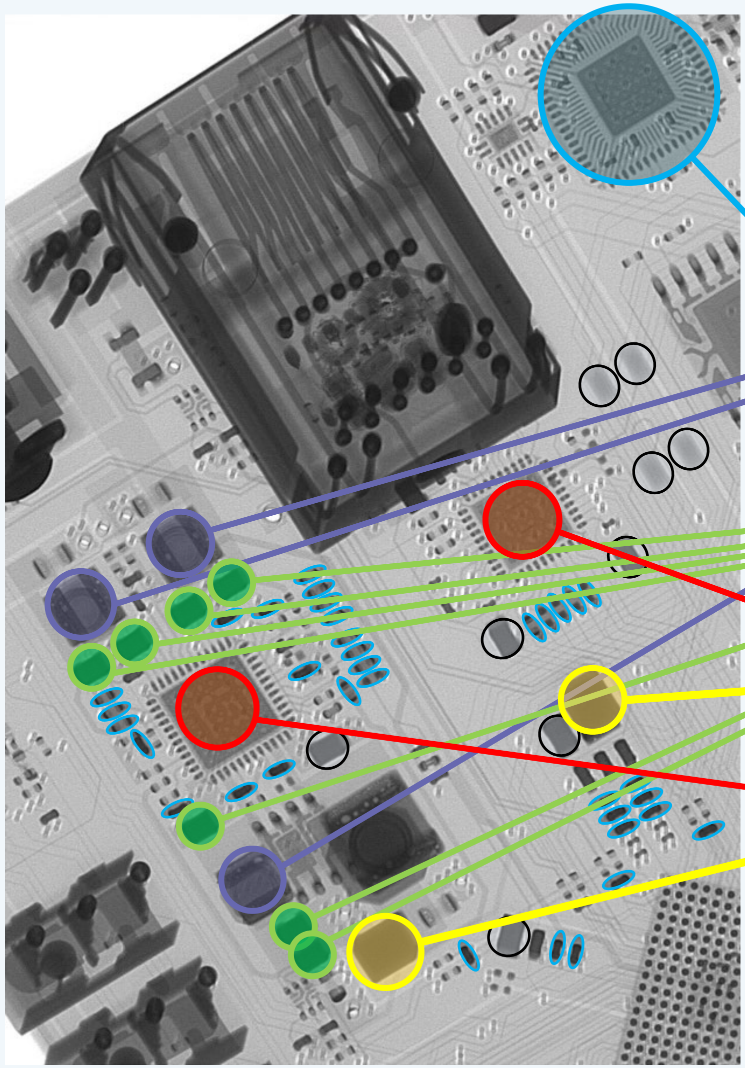
Problématique : BGA 208



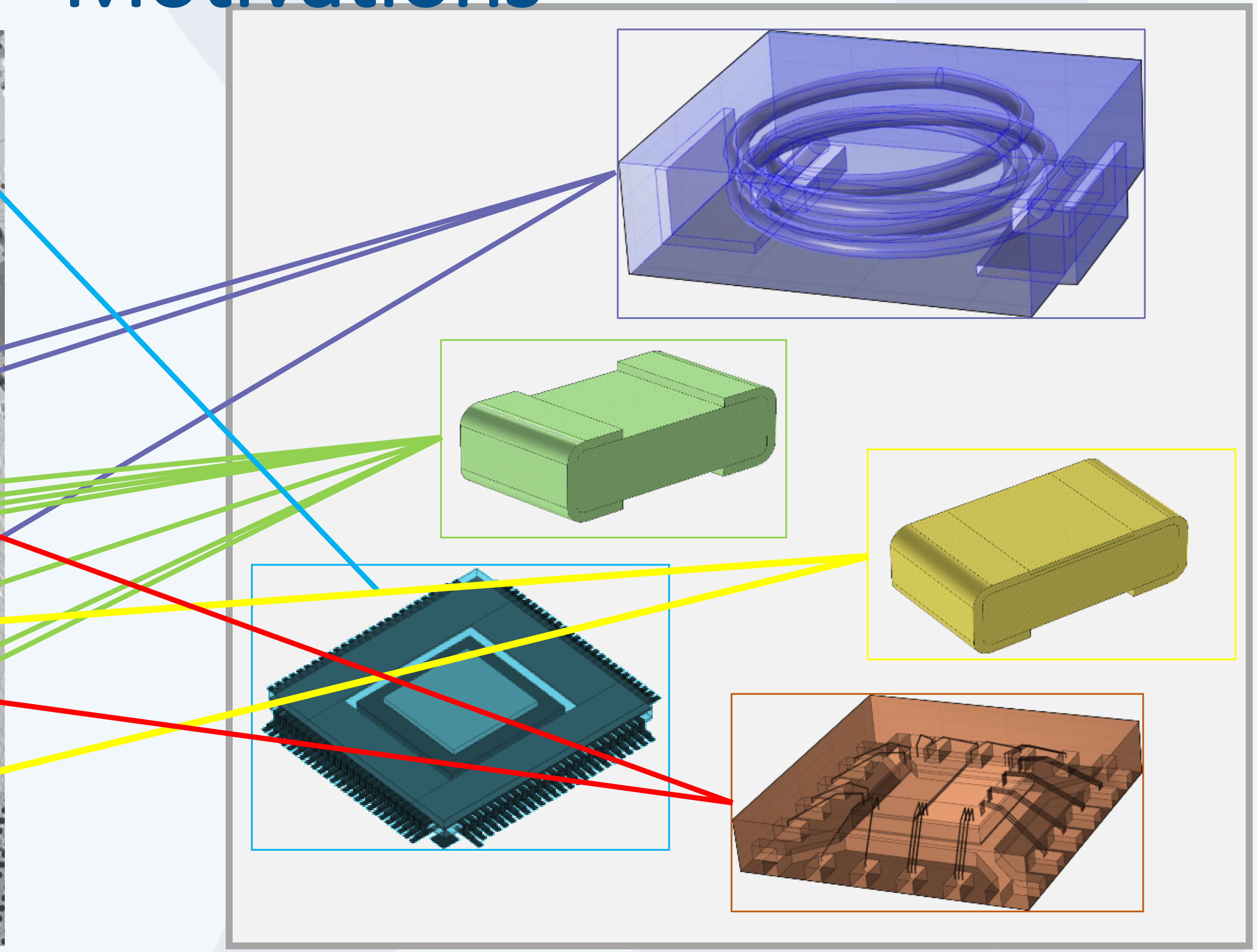
(a) Géométrie étudiée



Motivations



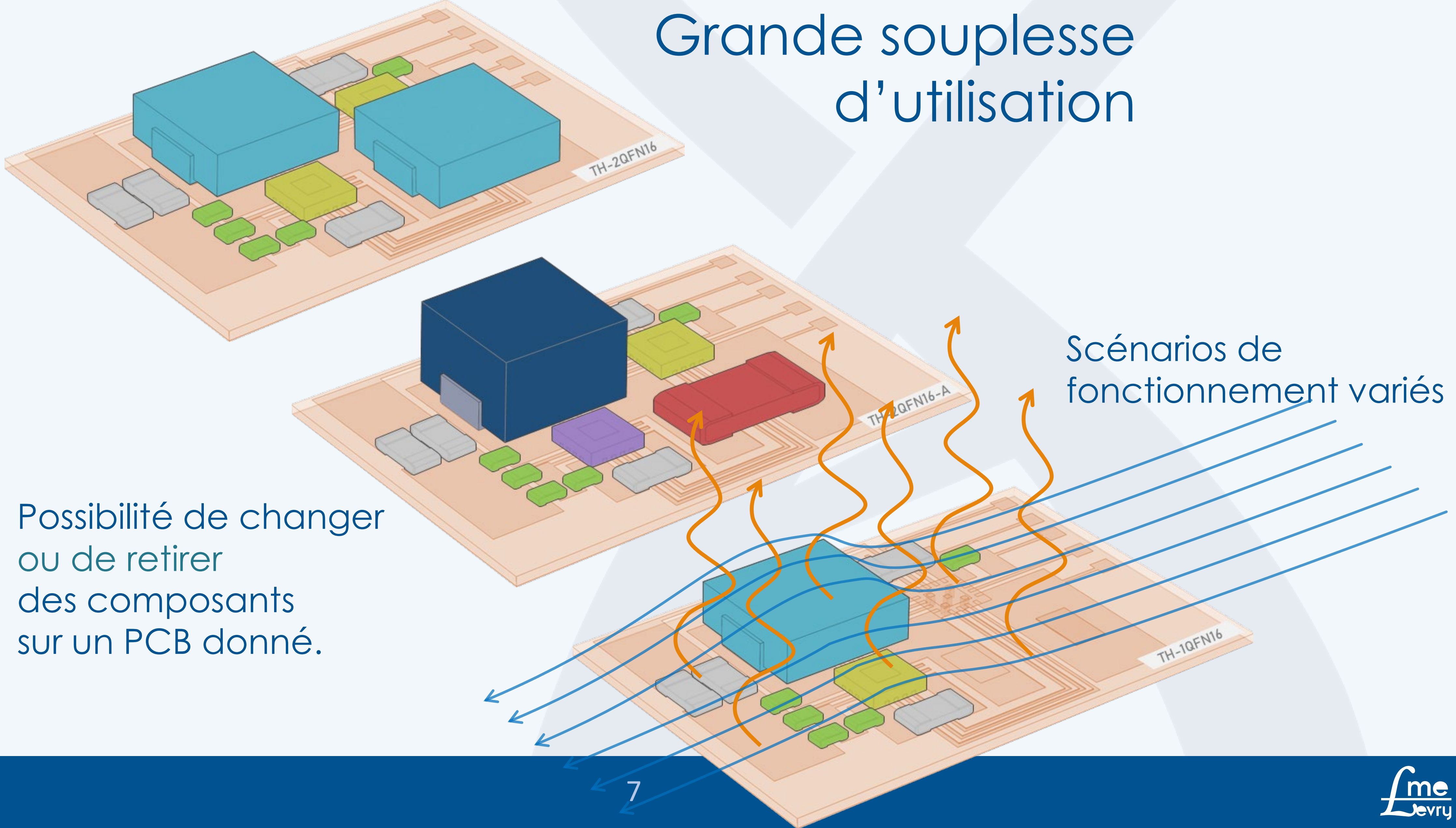
Carte électronique



Bibliothèque ?

Sous-structuration

Grande souplesse d'utilisation



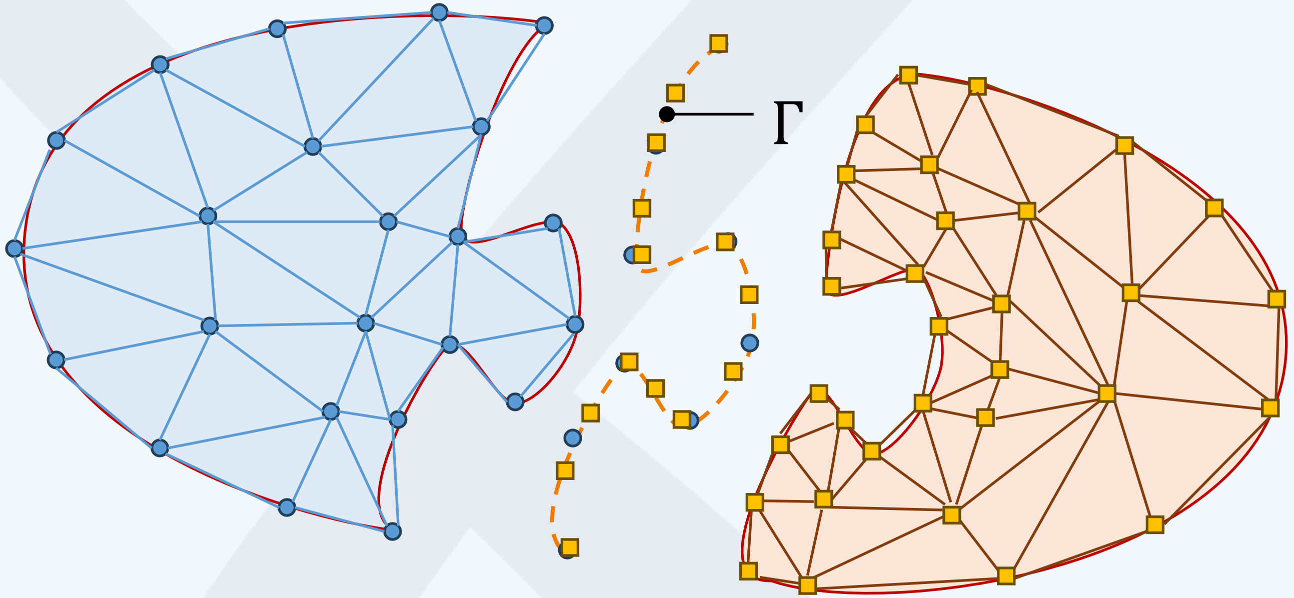
Possibilité de changer
ou de retirer
des composants
sur un PCB donné.

Scénarios de fonctionnement variés

Principe

Équation de la chaleur :

$$
\begin{cases}
c\,\dfrac{\partial T}{\partial t} = \underline{\nabla}\cdot\left(\kappa\,\underline{\nabla}T\right) & \text{sur } \Omega \\
\kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n} = h(T_f - T) & \text{sur } \partial\Omega \\
\left.\begin{array}{l}\kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n_1} + \kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n_2} = 0 \\ T_1 - T_2 = 0\end{array}\right\} & \text{sur } \Gamma^{\{1,2\}}
\end{cases}
$$



Formulation variationnelle sur les deux domaines :

Introduction d'une nouvelle variable

$$\varphi = \underline{\underline{\kappa}}\cdot\underline{\nabla}T\cdot\underline{n_2}$$

$$
\int_{\Omega_1} c\,\frac{\partial T}{\partial t}\,g_1 \;-\; \int_{\Omega_1} \kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{\nabla}g_1 \;+\; \int_{\partial\Omega} h(T_f - T)\,g_1\,d\sigma \;+\; \int_{\Gamma^{1,2}} \varphi\,g_1\,d\sigma
$$

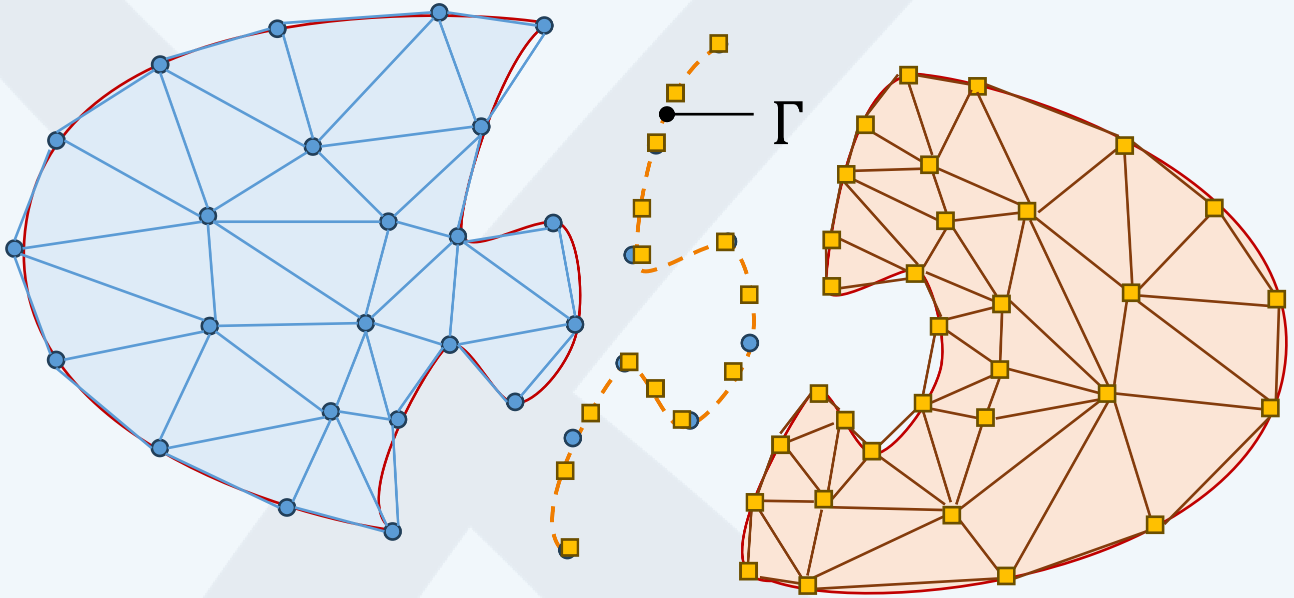
$$=$$

$$
+\int_{\Omega_2} c\,\frac{\partial T}{\partial t}\,g_2 \;+\; \int_{\Omega_2} \kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{\nabla}g_2 \;+\; \int_{\partial\Omega_2} h(T_f - T)\,g_2\,d\sigma \;+\; \int_{\Gamma^{2,1}} \varphi\,g_2\,d\sigma
$$

Interfaces non conformes

Équation de la chaleur :

$$
\begin{cases}
c\,\dfrac{\partial T}{\partial t} = \underline{\nabla}\cdot\left(\kappa\,\underline{\nabla}T\right) & \text{sur } \Omega \\[2ex]
\kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n} = h(T_f - T) & \text{sur } \partial\Omega \\[2ex]
\left.\begin{aligned} &\kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n_1} + \kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n_2} = 0 \\ &T_1 - T_2 = 0 \end{aligned}\right\} & \text{sur } \Gamma^{\{1,2\}}
\end{cases}
$$



Formulation variationnelle sur les deux domaines :

$$\int_\Omega c\,\frac{\partial T}{\partial t} g = -\int_\Omega \kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{\nabla}g \; + \int_{\partial\Omega} h(T_f - T)g\,d\sigma + \int_\Gamma \varphi [\![g]\!] d\sigma$$

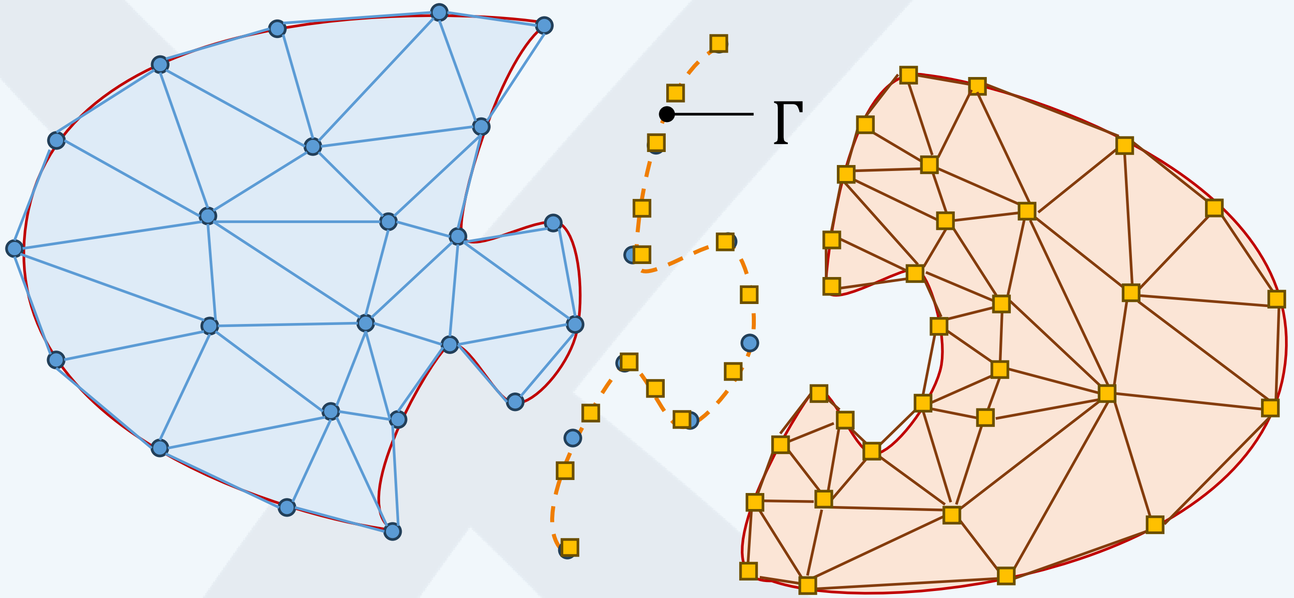
Saut de fonction test

continuité au sens faible $\int_\Gamma [\![T]\!]_\Gamma \phi_i = 0$ Saut de température

Interfaces non conformes

Équation de la chaleur :

$$\begin{cases} c\dfrac{\partial T}{\partial t} = \underline{\nabla}\cdot(\kappa\,\underline{\nabla}T) & \text{sur } \Omega \\ \kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n} = h(T_f - T) & \text{sur } \partial\Omega \\ \left.\begin{array}{l} \kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n_1} + \kappa\,\underline{\nabla}T\cdot\underline{n_2} = 0 \\ T_1 - T_2 = 0 \end{array}\right\} & \text{sur } \Gamma^{\{1,2\}} \end{cases}$$



$$\varphi(x,t) = \sum_i \varphi_i(t)\phi_i(x)$$

Formulation variationnelle sur les deux domaines :

$$\int_\Omega c\frac{\partial T}{\partial t}g = -\int_\Omega \underline{\nabla}T\cdot\underline{\underline{\kappa}}\cdot\underline{\nabla}\,\mathrm{g} + \int_{\partial\Omega} h(T_f - T)g\,d\sigma + \int_\Gamma \varphi\,[\![g]\!]\,d\sigma$$

Nouvelles inconnues

$$\int_\Gamma [\![T]\!]_\Gamma\phi_i = 0$$

Fonctions spatiales définies sur une interface

Fonctions mortiers

Interfaces non conformes

$$\int_{\Omega} c\,\frac{\partial T}{\partial t}\,g = -\int_{\Omega} \underline{\nabla}\,T \cdot \underline{\underline{\kappa}} \cdot \underline{\nabla}\,g \;+ \int_{\partial\Omega} h\big(T_f - T\big)g\,d\sigma \;+ \int_{\Gamma} \varphi\,[\![g]\!]\,d\sigma$$

$$\int_{\Gamma} [\![T]\!]_{\Gamma}\phi_i \;= 0$$

$$\varphi(x,t) = \sum_i \varphi_i(t)\phi_i(x)$$

Nouvelles inconnues

Fonctions spatiales
définies sur l'interface

Fonctions mortiers

Interfaces non conformes

$$\int_{\Omega} c\,\frac{\partial T}{\partial t}\,g = -\int_{\Omega} \underline{\boldsymbol{\nabla}}\,T \cdot \underline{\underline{\kappa}} \cdot \underline{\boldsymbol{\nabla}}\,g + \int_{\partial\Omega} h\left(T_f - T\right) g\,d\sigma + \int_{\Gamma} \varphi\,[\![g]\!]\,d\sigma$$

$$\int_{\Gamma} [\![T]\!]_{\Gamma}\,\phi_i = 0$$

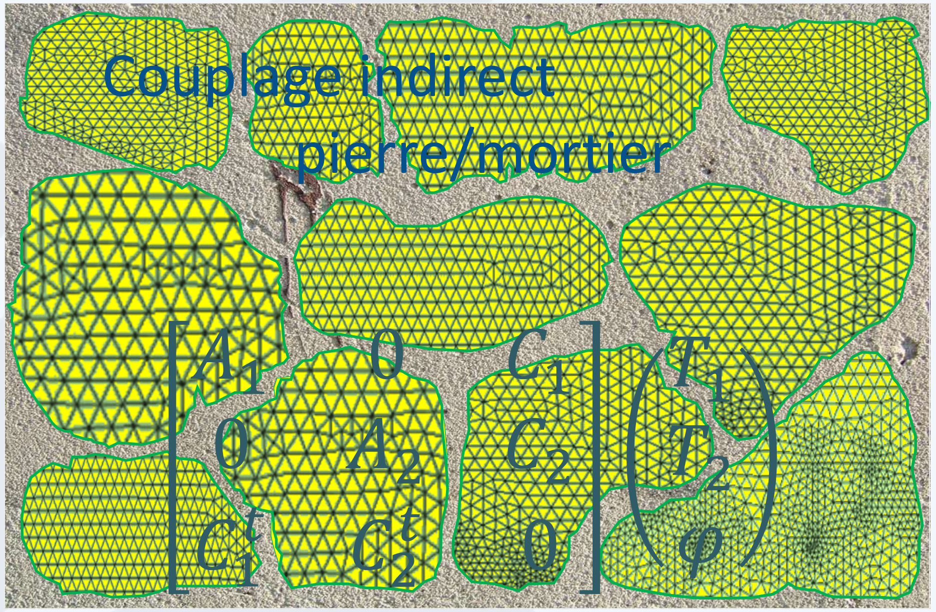
$$\varphi(x,t) = \sum_i \varphi_i(t)\,\phi_i(x)$$

Nouvelles inconnues

Fonctions spatiales définies sur l'interface

Fonctions mortiers

Ajout de matière



Couplage indirect pierre/mortier

$$\begin{bmatrix} A_1 & 0 & C_1 \\ 0 & A_2 & C_2 \\ C_1^t & C_2^t & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \varphi \end{pmatrix}$$

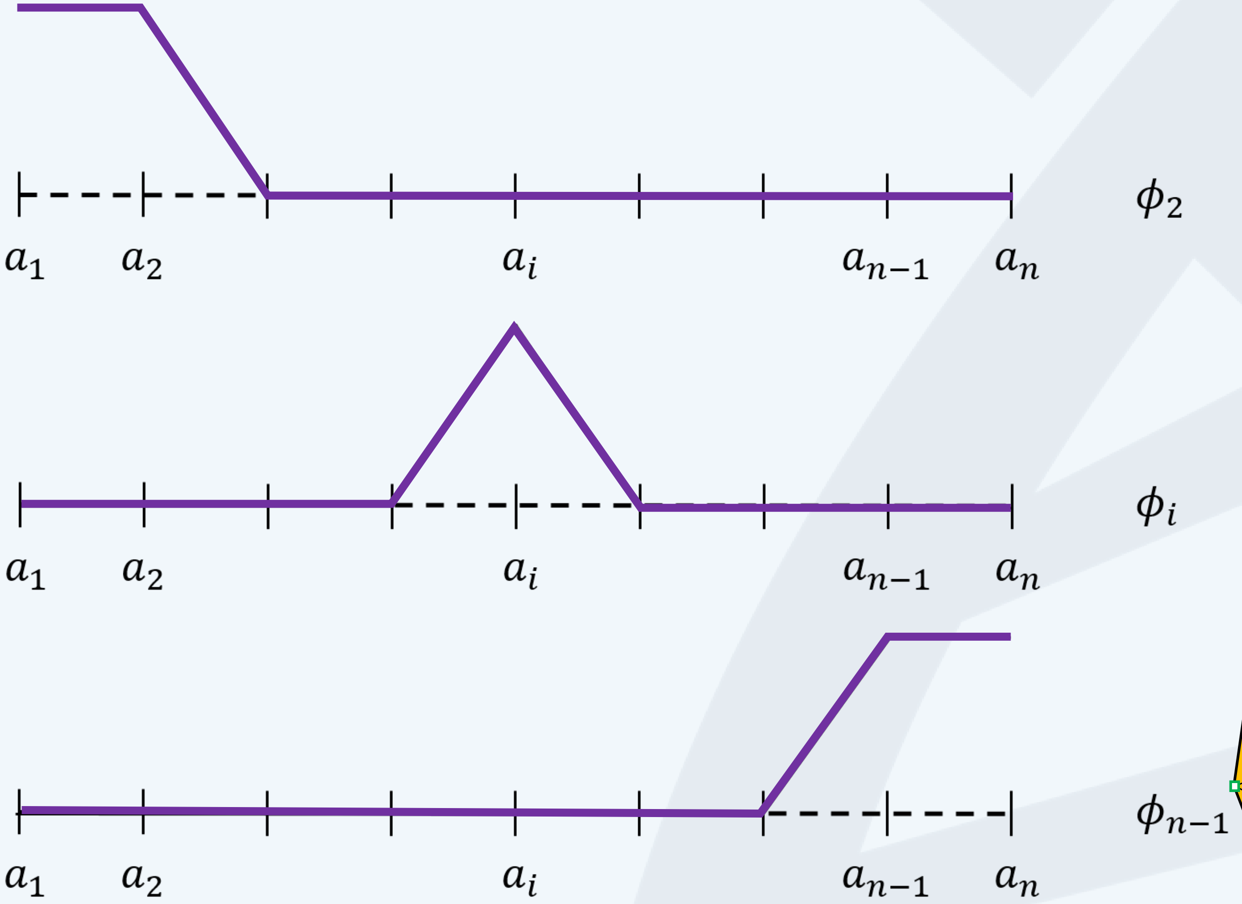
Formulation matricielle

Quelles fonctions mortiers prendre ?

$\Gamma^{\{1,2\}}$

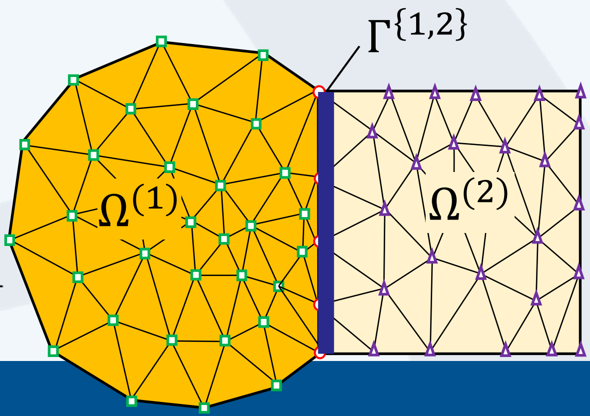
$$\varphi = \sum_{m=1}^{\tilde{N}_\phi} x_m^\phi \phi_m$$

Fonctions ***mortiers***



Frontière 1D :

Fonctions à flux nul sur le bord de $\Gamma^{\{1,2\}}$



Quelles fonctions mortiers prendre ?

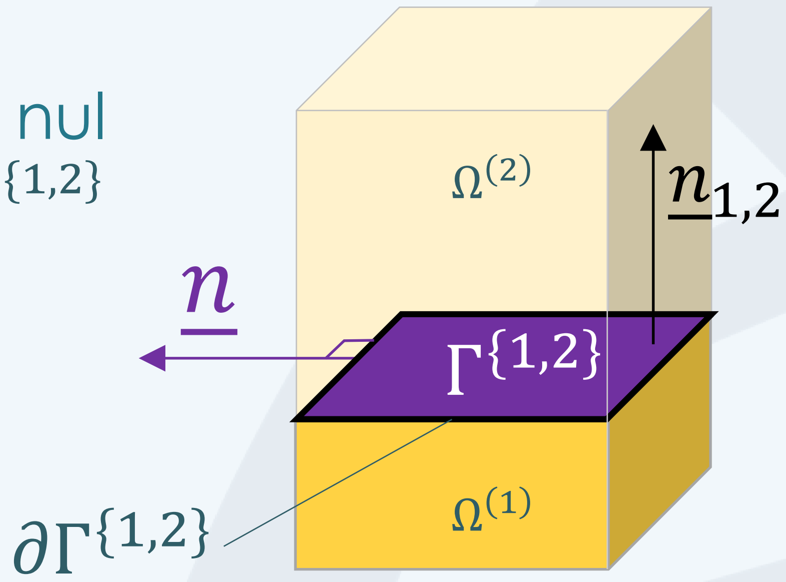
$$\Gamma^{\{1,2\}} \quad -\Delta V^N = \lambda^N V^N$$

$$\partial\Gamma^{\{1,2\}} \quad \nabla V^N \cdot \underline{n} = 0$$

Problème aux valeurs propres de

Neumann

Fonctions à flux nul
sur le bord de $\Gamma^{\{1,2\}}$



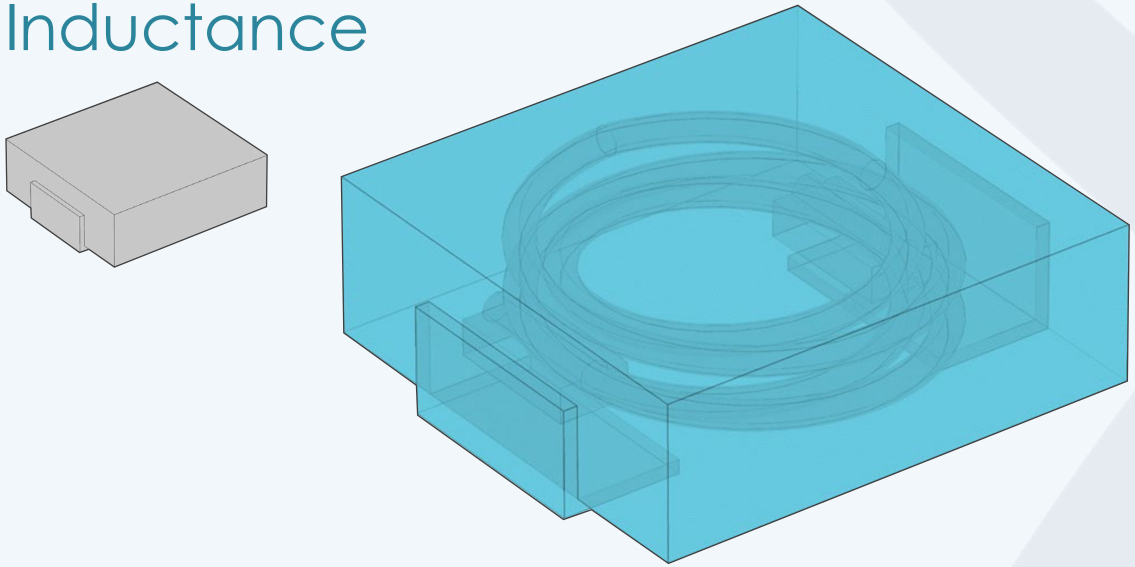
On peut **réduire** cette **famille de modes propres**

Exemples de résultats

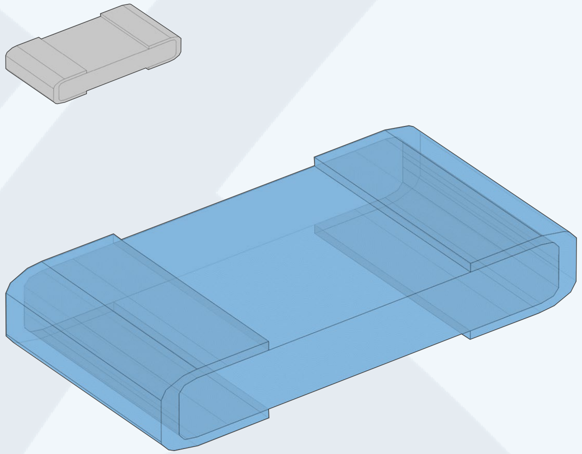
Création de la bibliothèque

4 familles de Composants

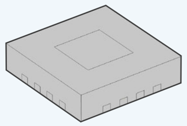
Inductance

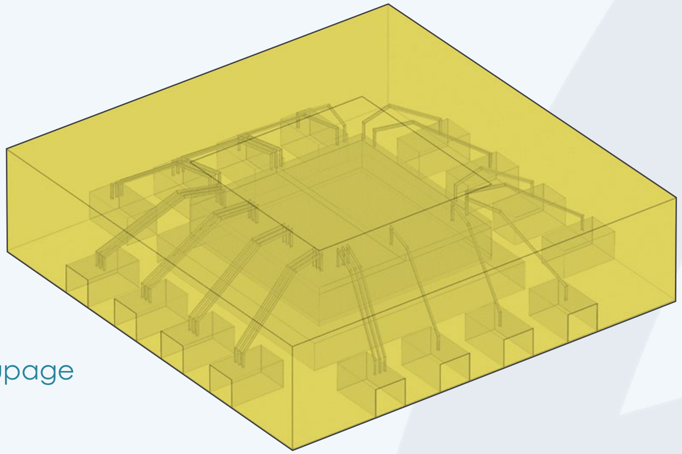


Capacité



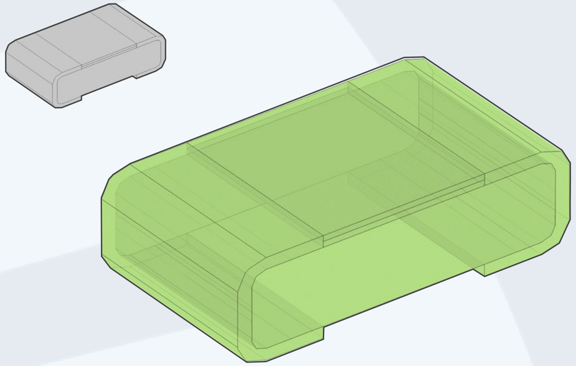
QFN16





Abaisseur de tension à découpage
ISL 8026A

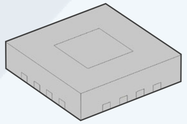
Résistance

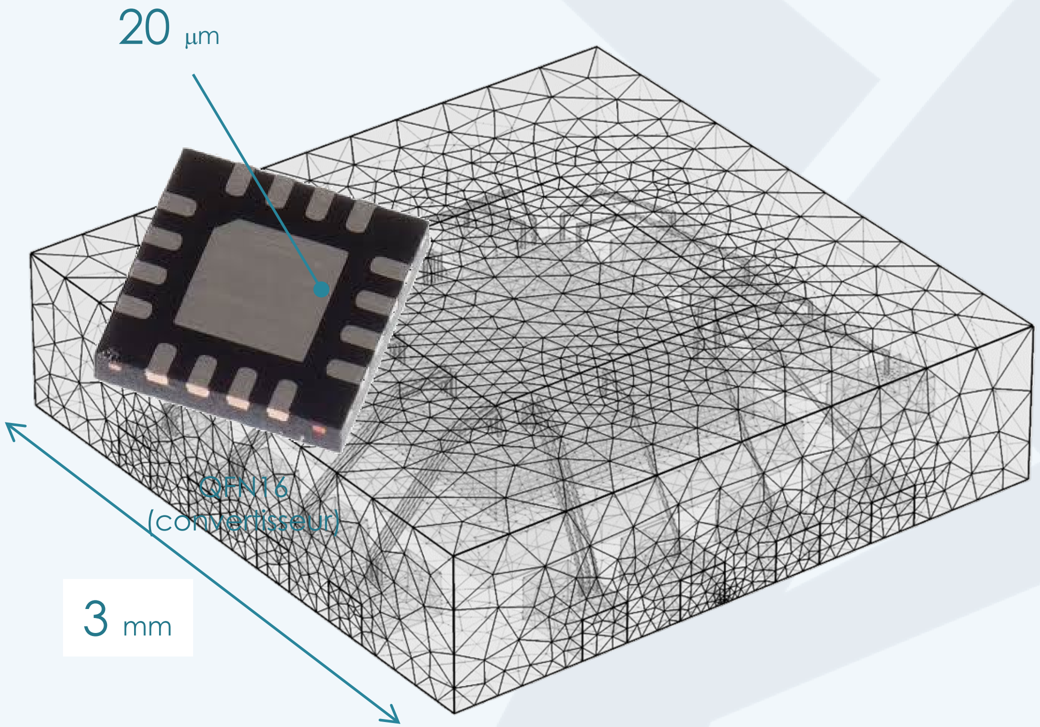


Création de la bibliothèque

Réduction d'un composant

Abaisseur de tension à découpage





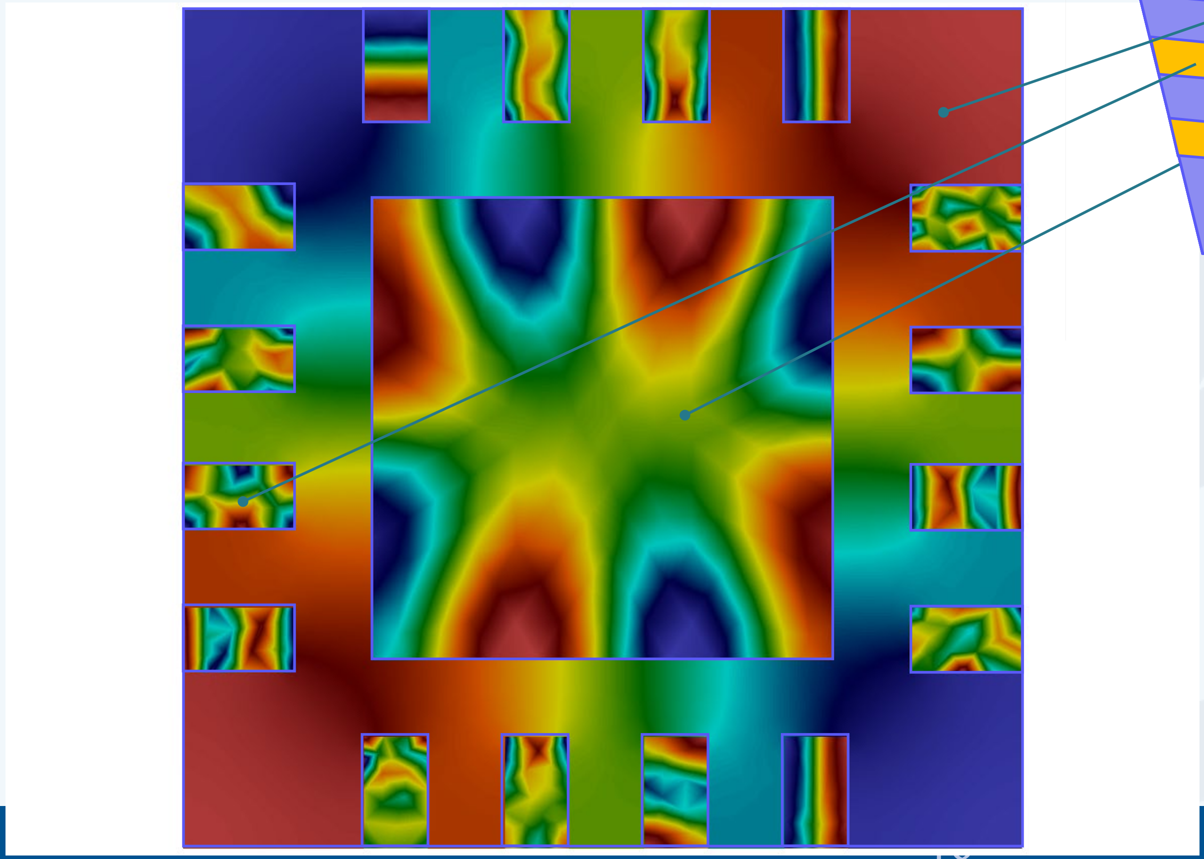
Calcul des modes ⇒ maillage : ~30 000 nœuds

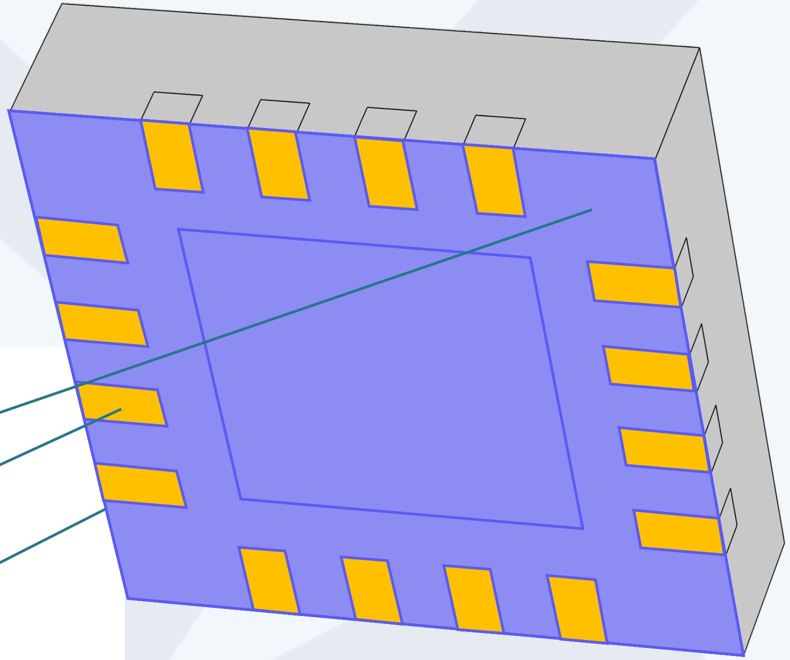
Réduction d'un composant

Calcul des fonctions mortiers :

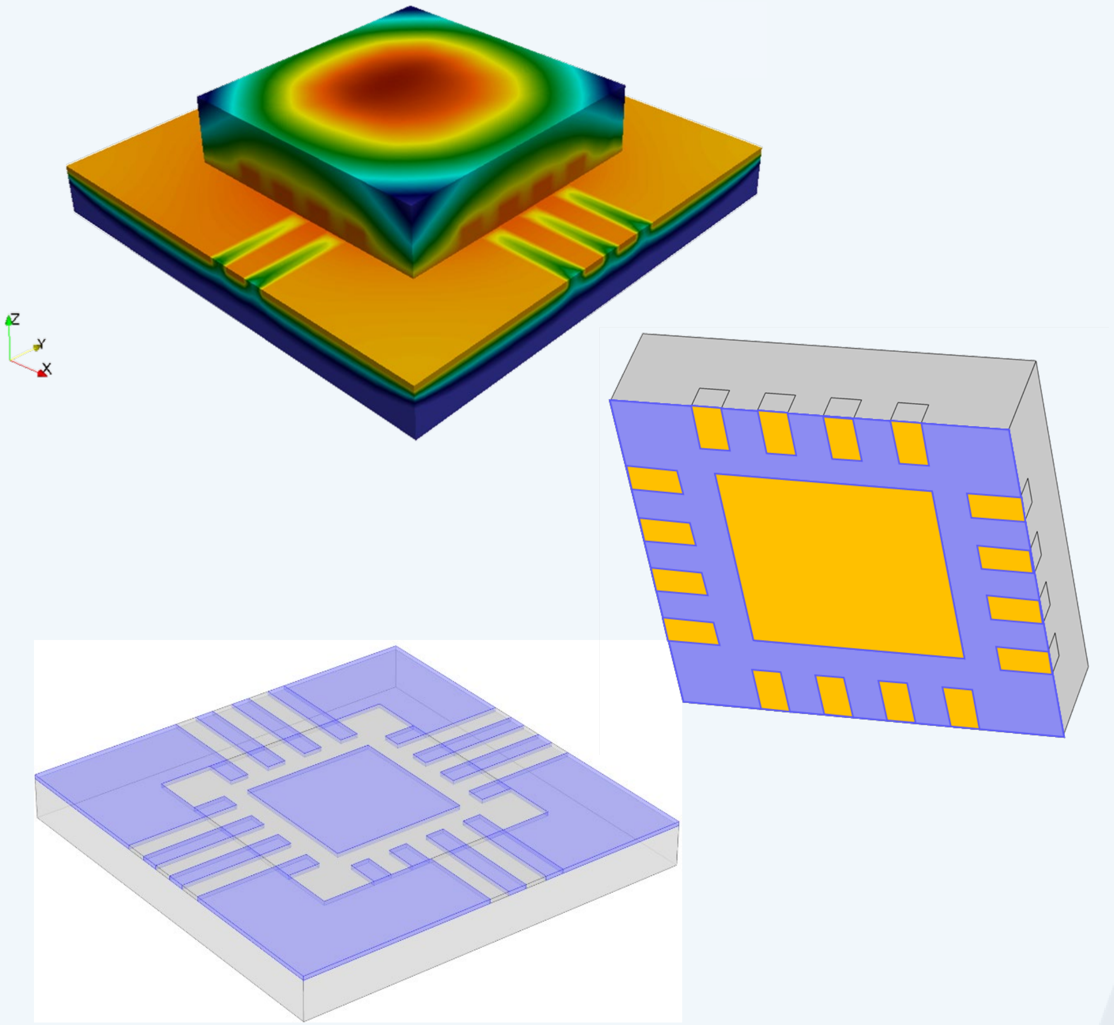
modes de Neumann

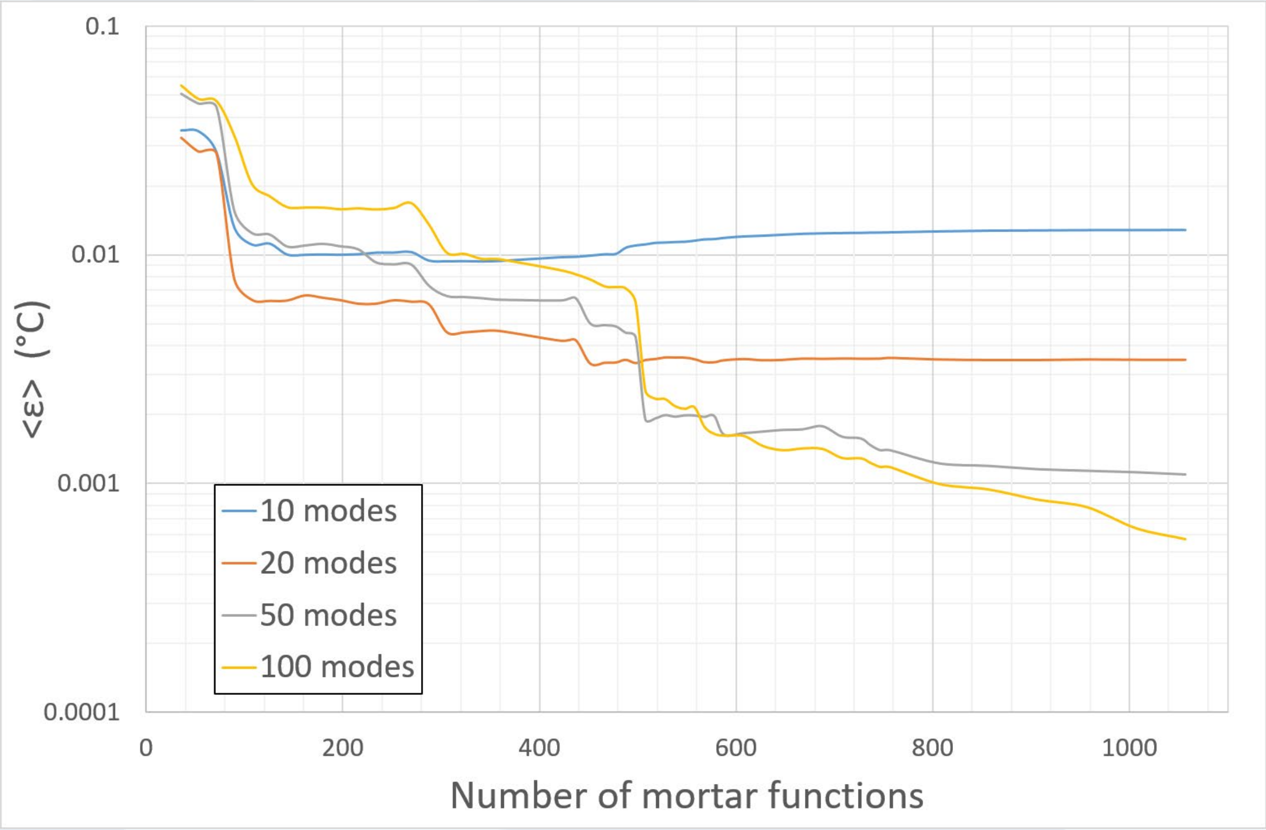
18 interfaces





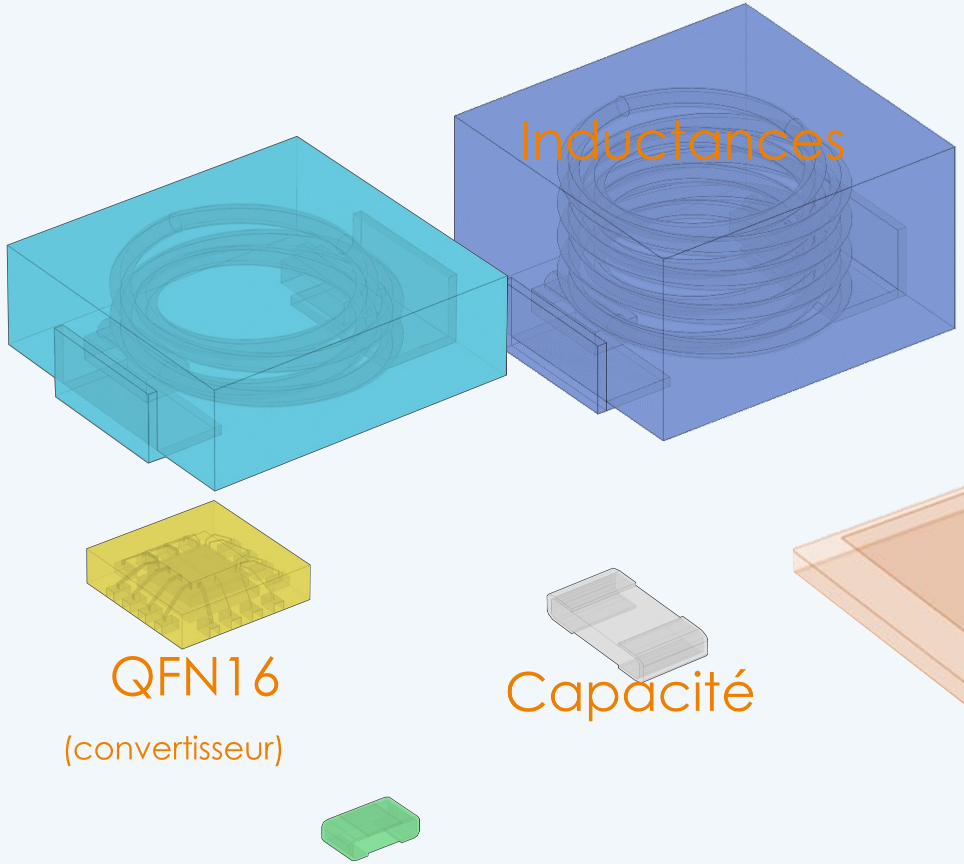
Mini-carte



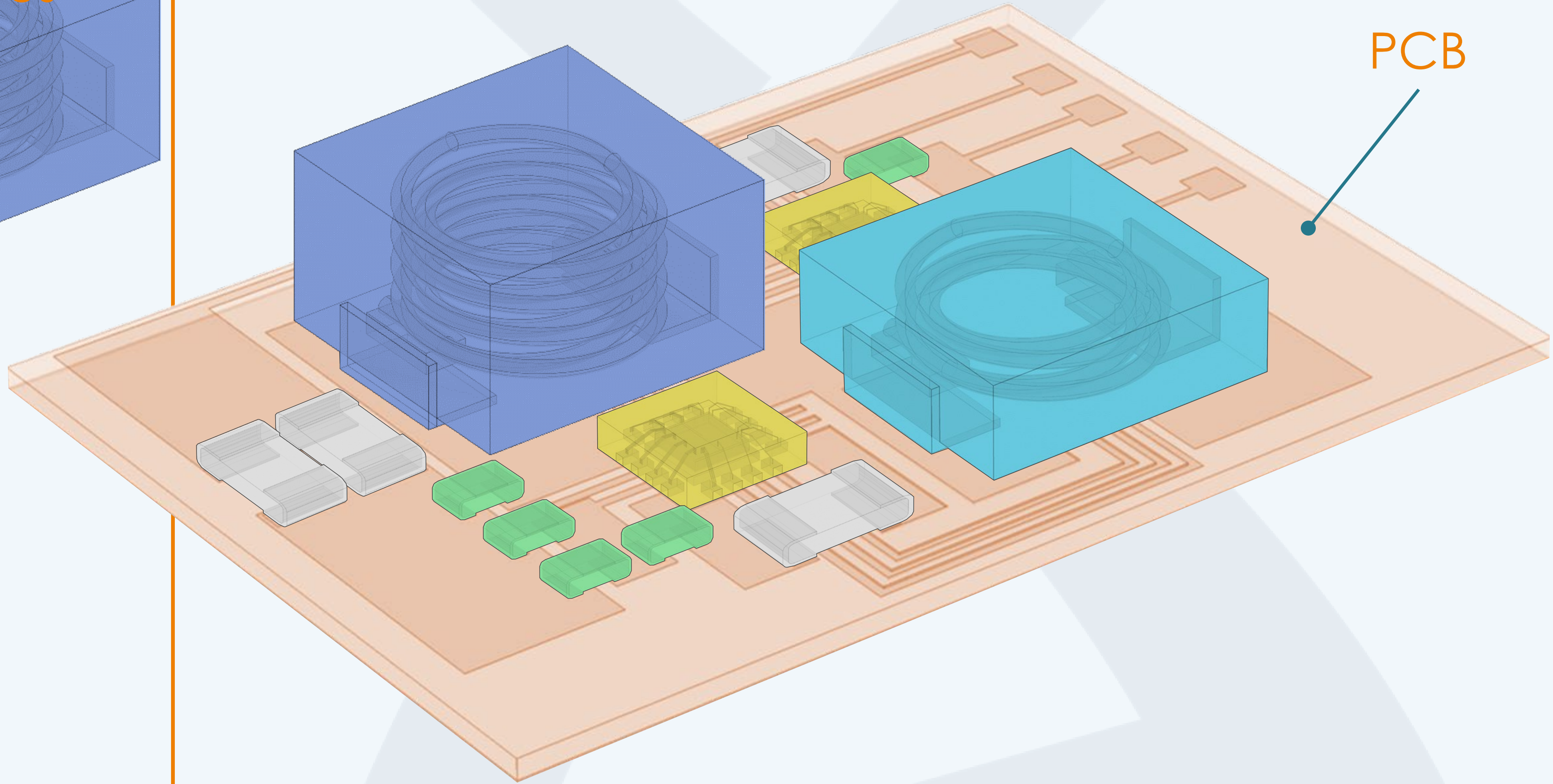


0.1
0.01
0.001
0.0001
0
200
400
600
800
1000
<ε> (°C)
Number of mortar functions
10 modes
20 modes
50 modes
100 modes

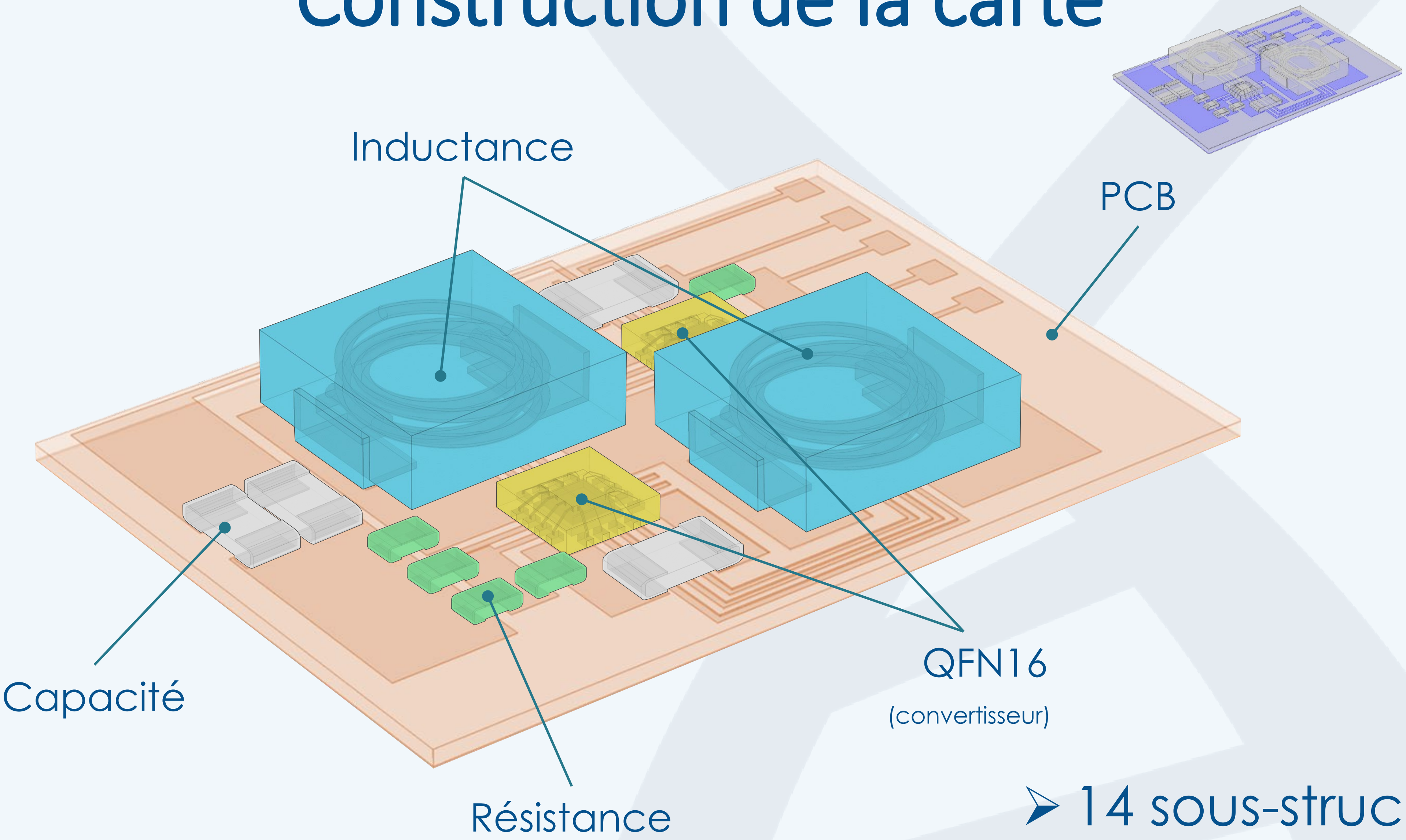
Sous-structuration modale



Bibliothèque de composants réduits



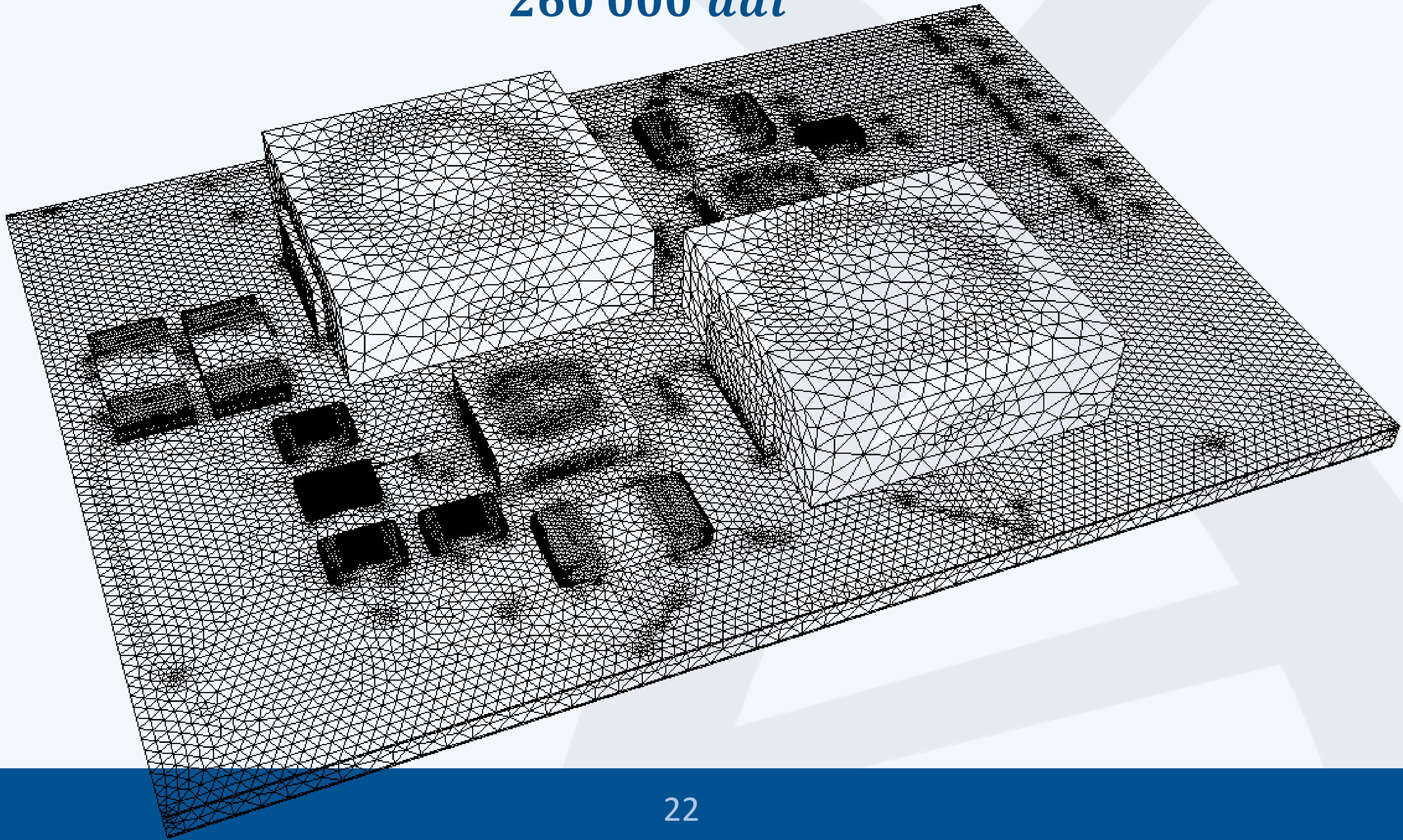
Construction de la carte



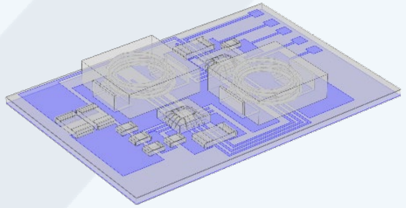
- 14 sous-structures
- 58 interfaces

Construction de la carte

Nœuds + mortiers (fonctions de forme EF) :
$\mathbf{260\ 000}\ \boldsymbol{ddl}$



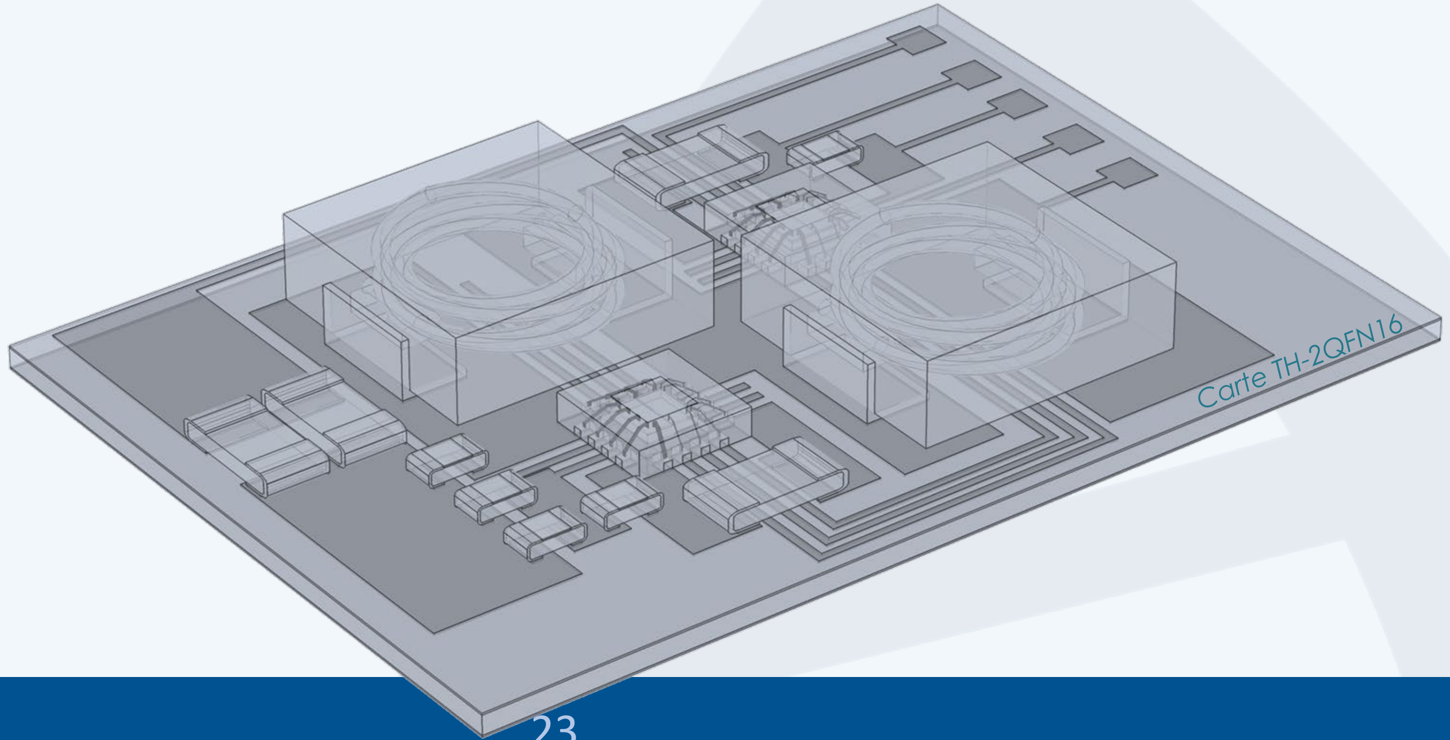
Simulation modale sous-structurée



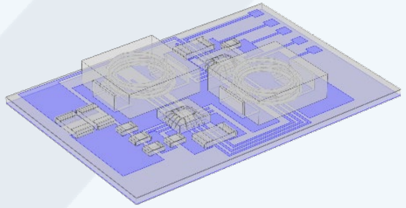
Taille du modèle réduit :

- 100 modes par composant actif et PCB
- 10 par composant passif
- 2 modes mortiers (Neumann) par interface :

$$\mathbf{706}\ \boldsymbol{ddl}\ \mathbf{vs}\ \mathbf{260\ 000}\ \boldsymbol{ddl}$$

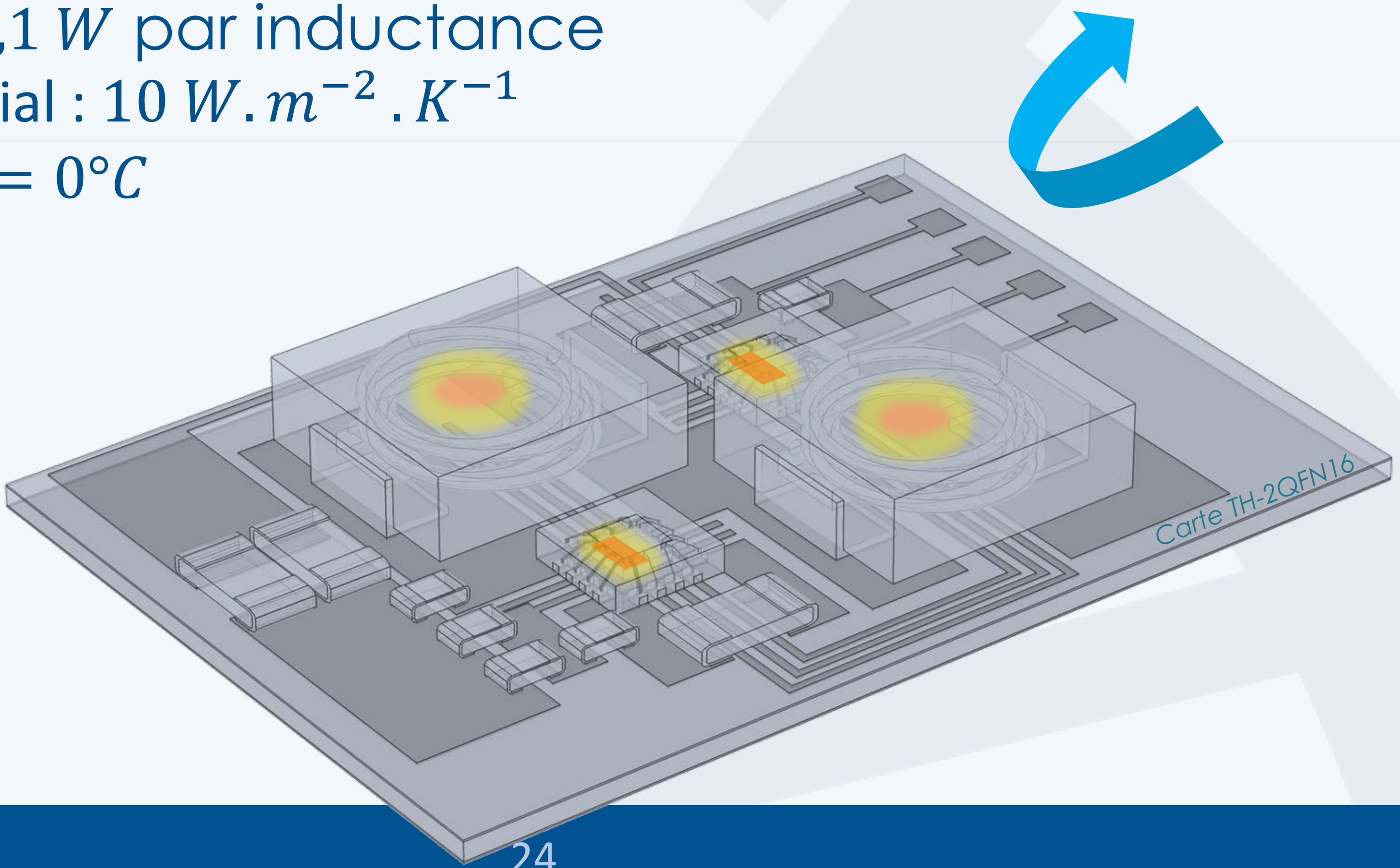


Simulation modale sous-structurée

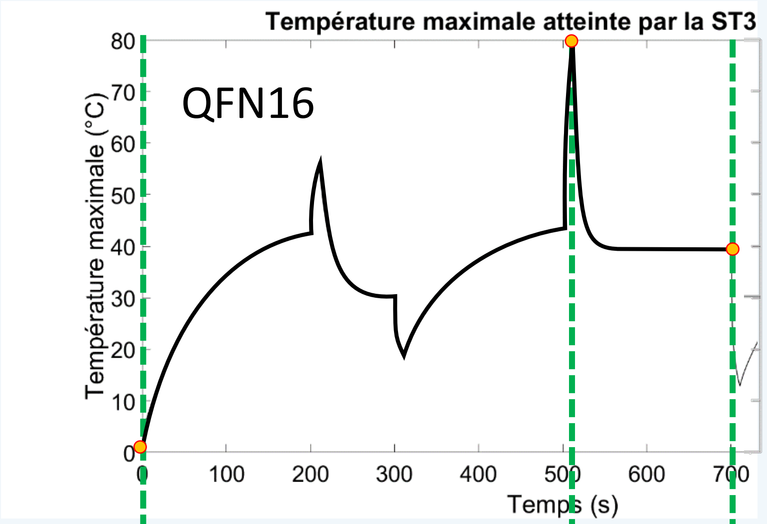


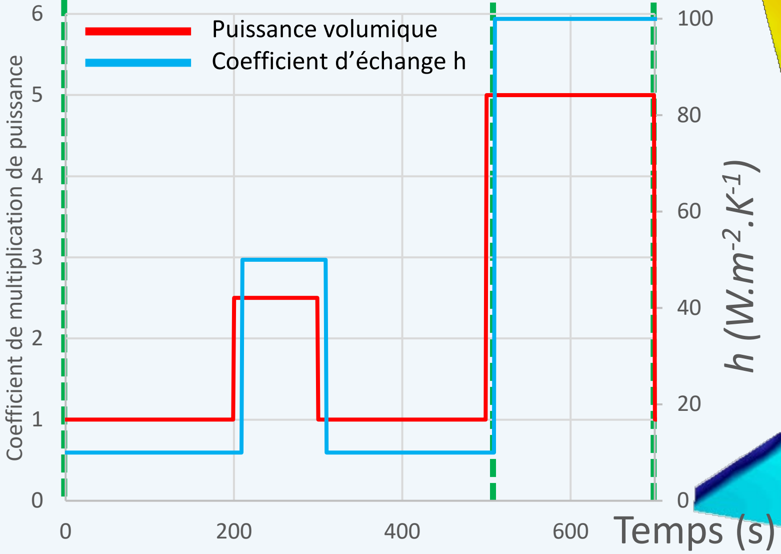
Paramètres de simulation : transitoire de $1000s$

- Puissances initiales dissipées :
  - $0{,}18\,W$ par QFN16
  - $0{,}1\,W$ par inductance
- h initial : $10\,W.m^{-2}.K^{-1}$
- $T_{ext} = 0°C$

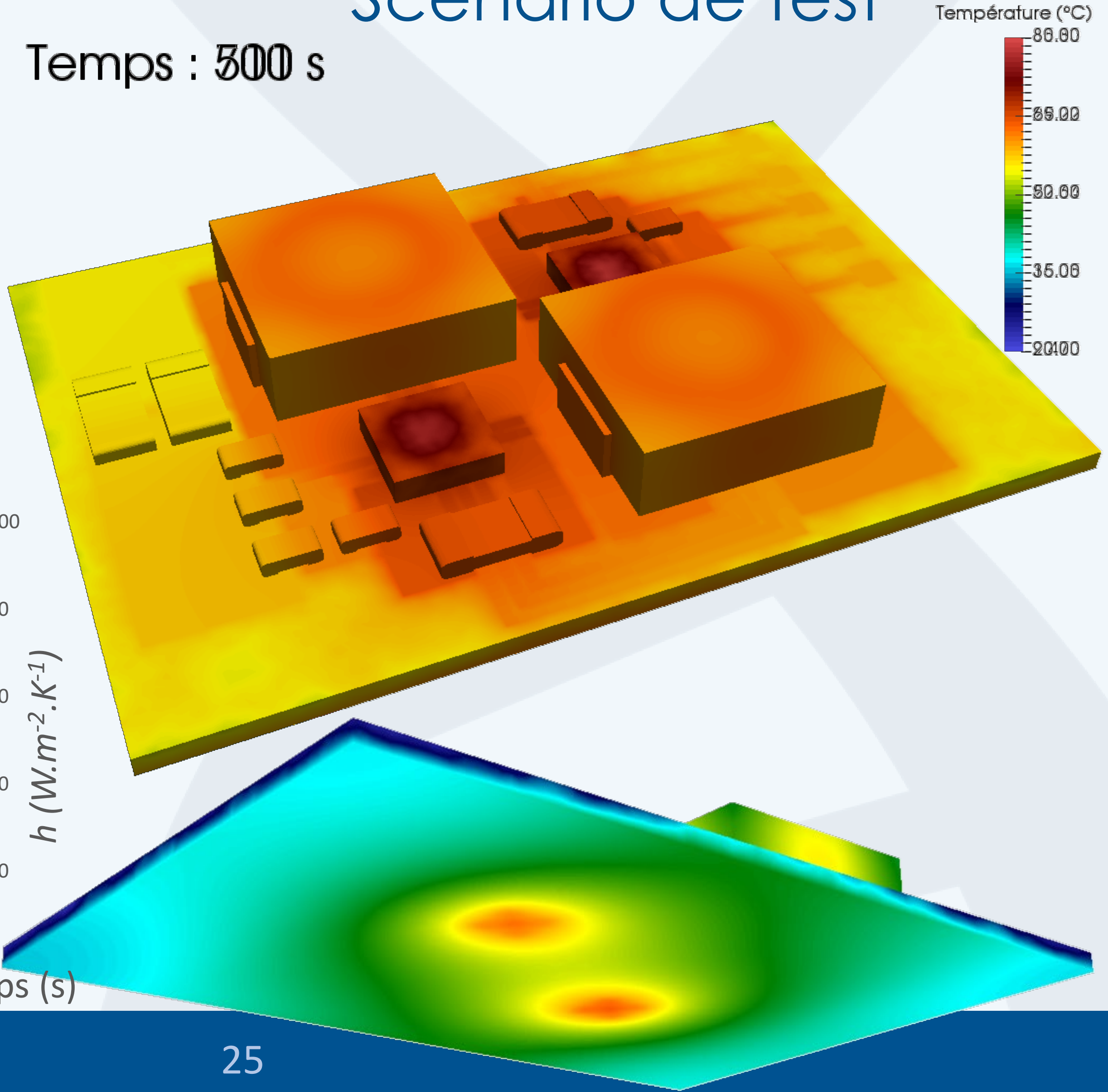


Simulation modale sous-structurée

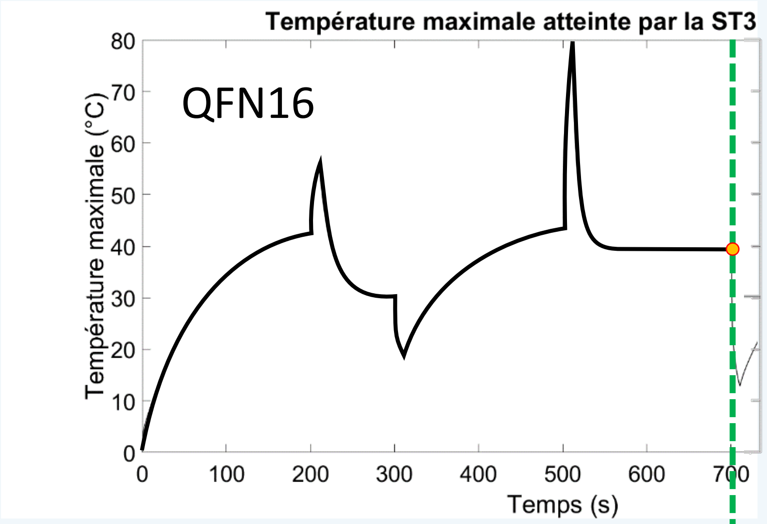


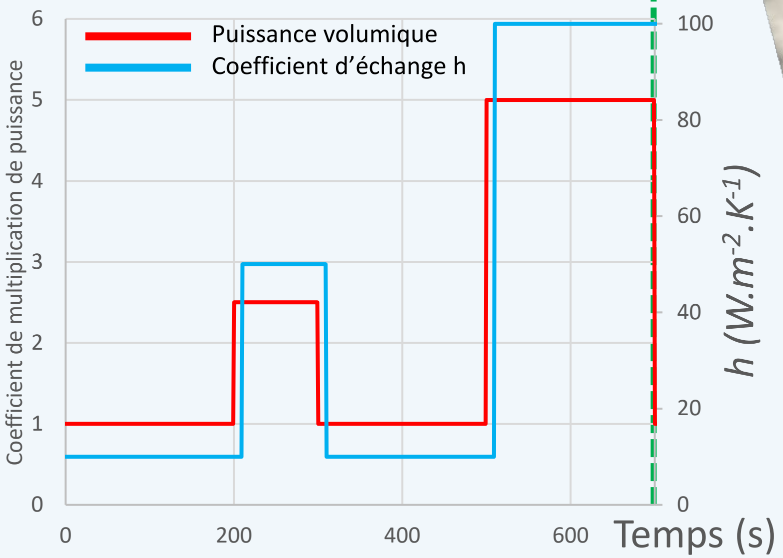


Scénario de test

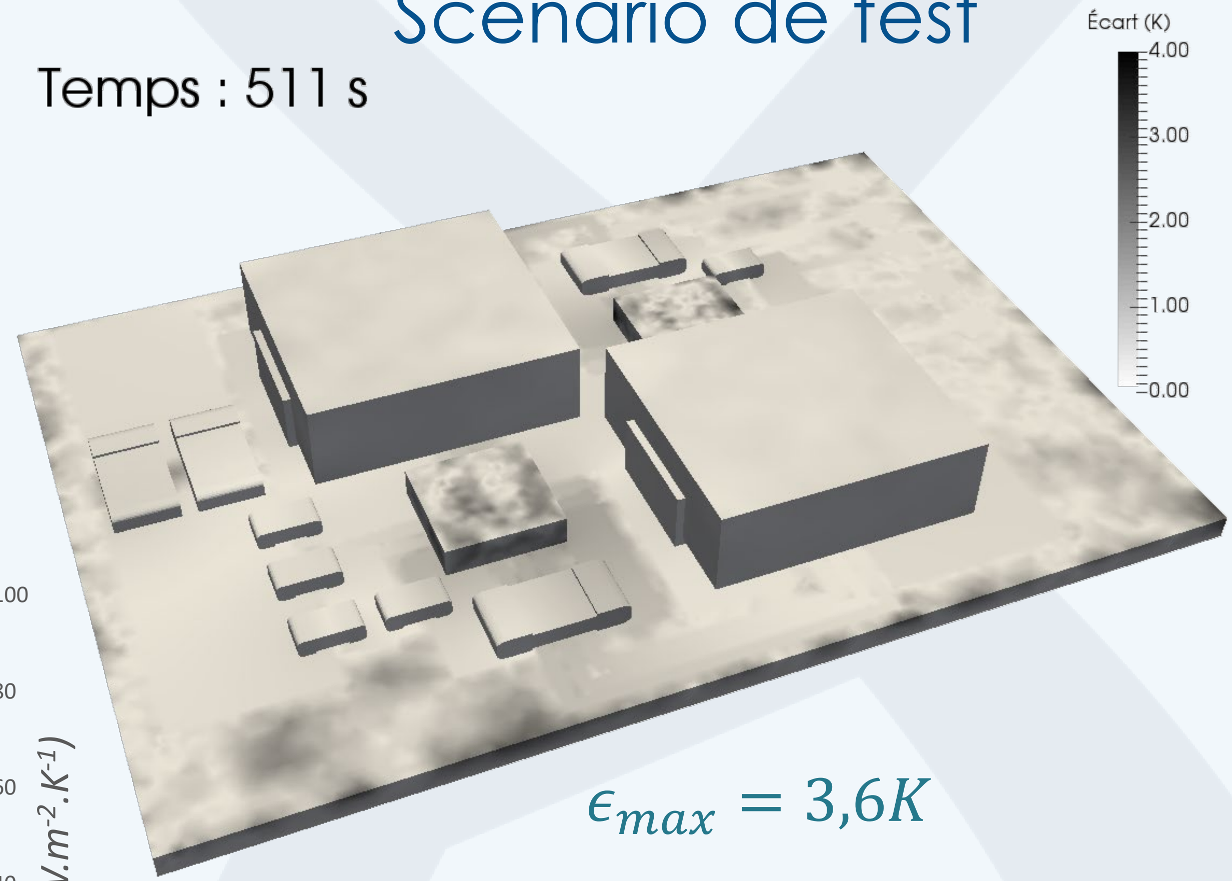


Simulation modale sous-structurée





Scénario de test



$$\epsilon_{max} = 3{,}6K$$

Evaluation du modèle sous-structuré réduit

Quelques chiffres :

Résolution du modèle détaillé : $851s$

Résolution du modèle réduit : $0{,}31s$ ⇒ temps / 2700

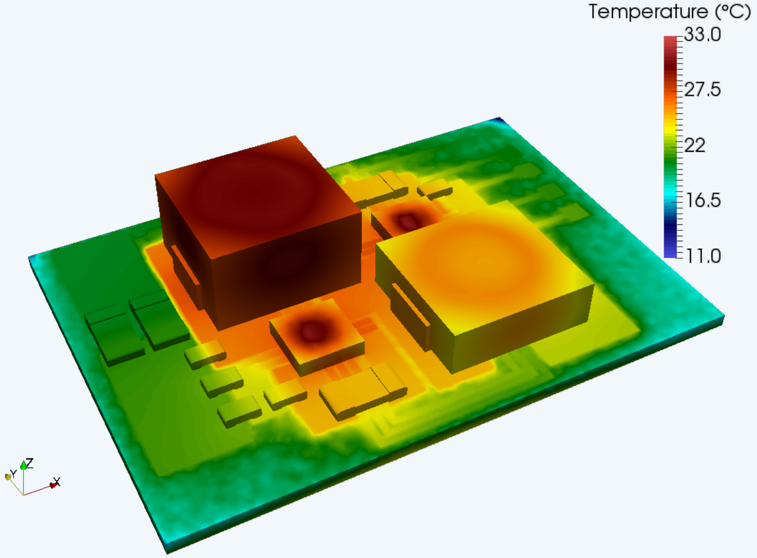
Écart moyen global : $\sim 0{,}2\%$ $(0{,}14\ K)$

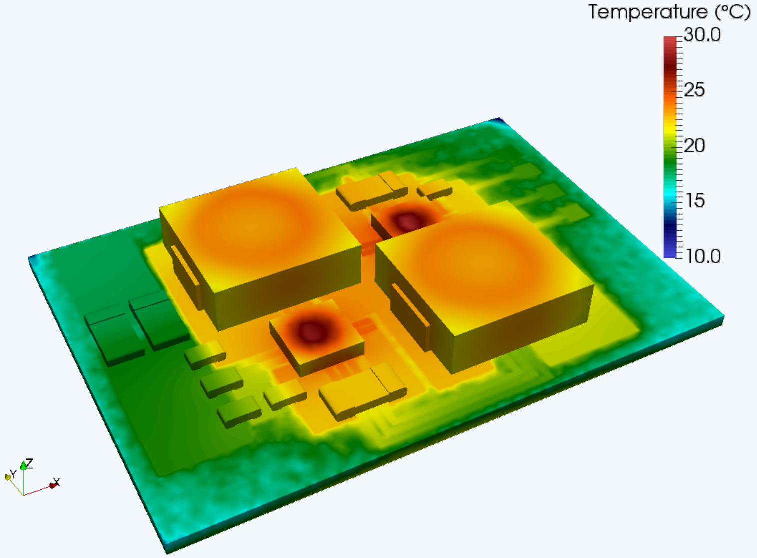
Écart moyen ST2 (QFN16) : $\sim 0{,}3\%$ $(0{,}23\ K)$

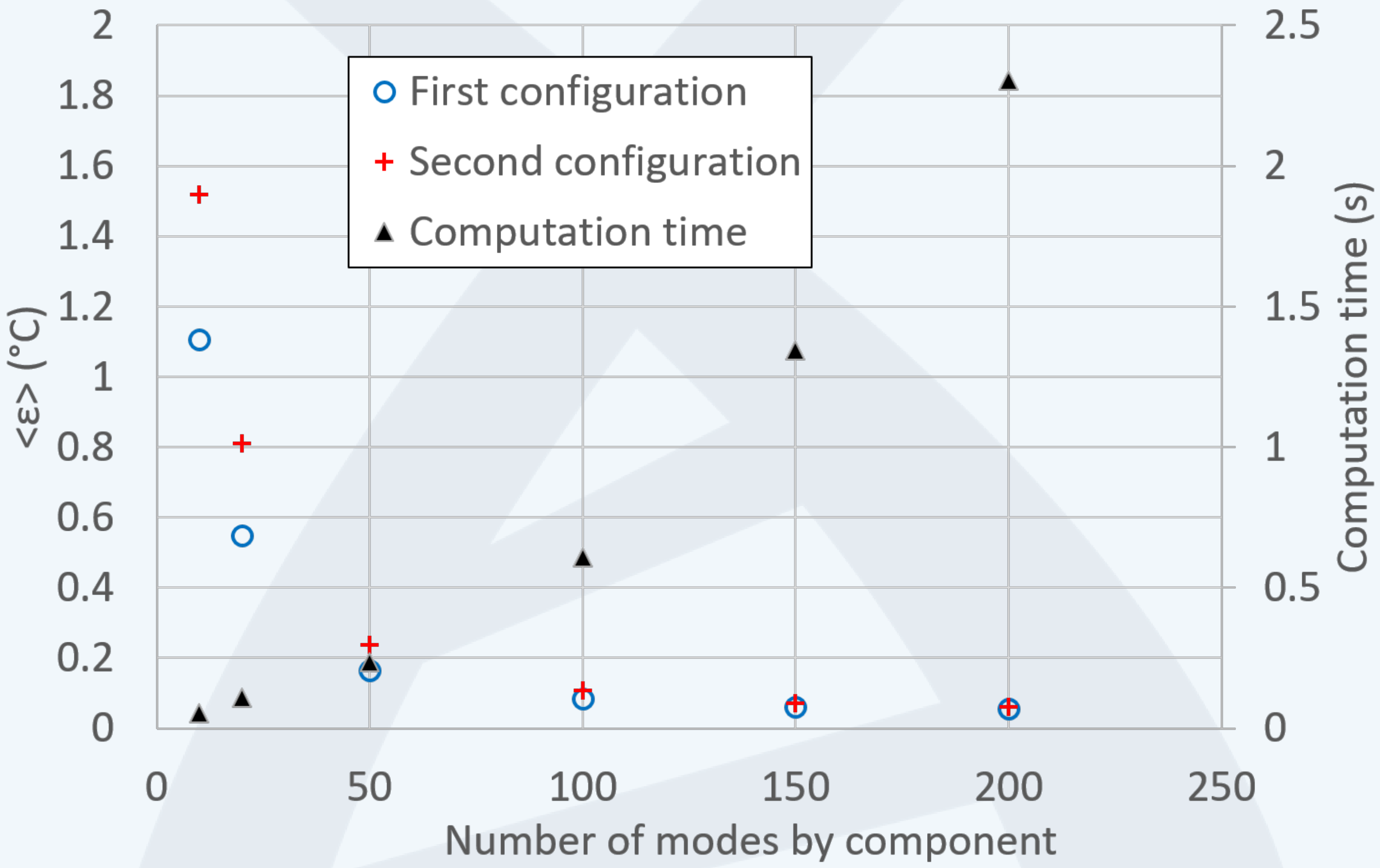
Écart moyen ST9 (capacité) : $< 0{,}5\%$ $(0{,}4K)$

Écart moyen ST14 (résistance) : $< 0{,}4\%$ $(0{,}32K)$

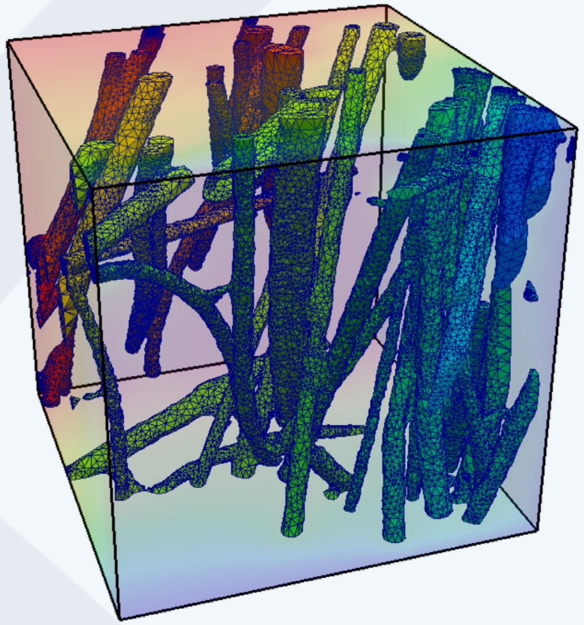
Écart sur les T_{max}: $< 0{,}5\%$ $(0{,}4\ K)$


Temperature (°C)
33.0
27.5
22
16.5
11.0


Temperature (°C)
30.0
25
20
15
10.0


First configuration
Second configuration
Computation time
<ε> (°C)
Computation time (s)
Number of modes by component
0
50
100
150
200
250
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
1.8
2
0.5
1.5
2.5

Bilan



- Sous-structuration modale
  - Problématique théorique
    - Est-ce que les modes de Neumann sont pertinents ?
    - Comment les réduire ?
    - Interaction modes de température / modes de flux
  - Problématique logicielle : comment décrire les frontières et les couplages quand le nombre de frontières devient trop importants ?

FIN