

Les procédés de chauffage par induction permettent d'atteindre une température élevée rapidement avec un contrôle précis de la zone thermiquement affectée. La complexité des couplages multiphysiques impliqués rend le procédé difficile à optimiser. Pour cela, un outil 3D incluant une étape d'optimisation a été développé.

### Modèle numérique multiphysique couplé

#### Electromagnétisme → Formulation A-V

$\nabla \cdot \vec{B} = 0$ Magnetic Flux	$\nabla \cdot \vec{E} = 0$ Maxwell-Gauss	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ Maxwell-Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ Maxwell-Ampere
$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$	$\vec{J} = \sigma(T) \vec{E}$	$\vec{B} = \mu(T,  \vec{H} ) \vec{H}$	
$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ Potentiel vecteur magnétique A	$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V$ Potentiel scalaire électrique V	$\nabla \cdot \vec{A} = 0$ Jauge de Coulomb	

→  $\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = -\sigma \nabla V$

#### Thermique →

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_{em}$$

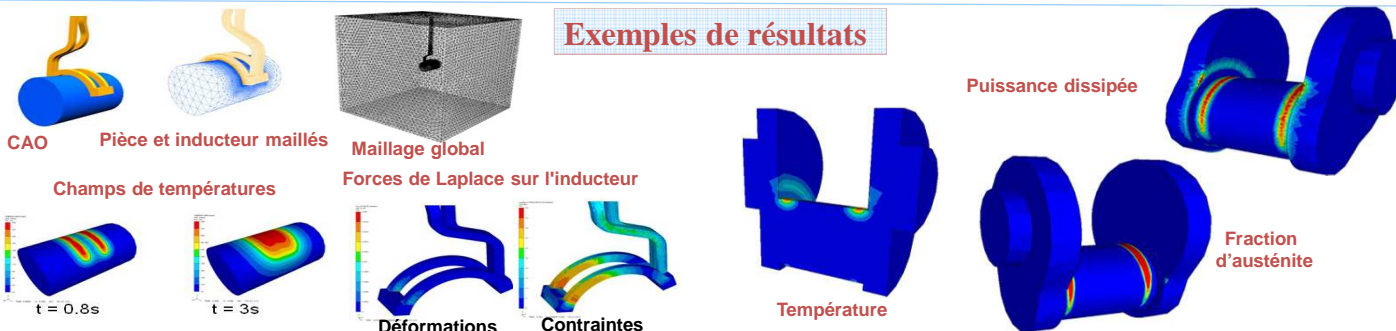
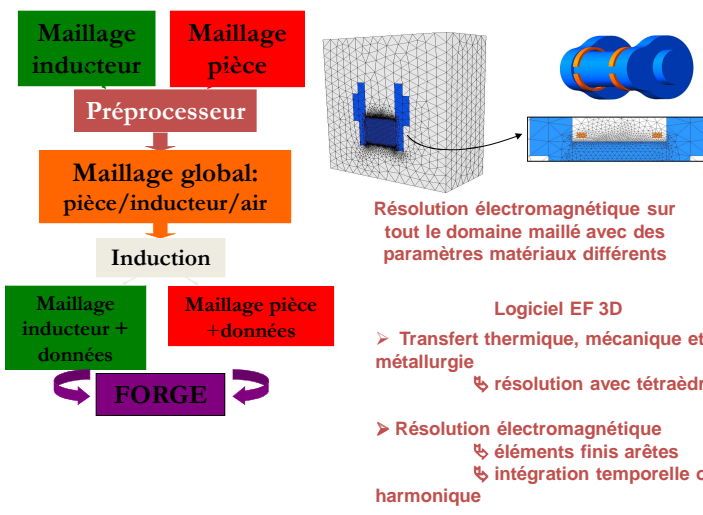
#### Mécanique →

- équation d'équilibre dynamique  $\nabla \cdot \sigma = \vec{0}$
- équation de compressibilité  $\nabla \cdot \vec{v} - Tr(\dot{\epsilon}) = 0$

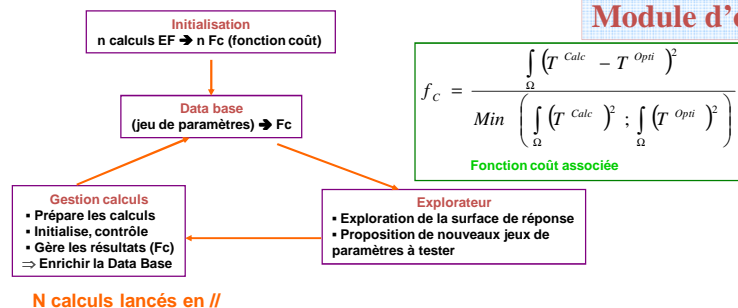
$$\dot{\epsilon}_{TOT} = \dot{\epsilon}_{Th} + \dot{\epsilon}_{Elas} + \dot{\epsilon}_{Inelas} + \dot{\epsilon}_{Metal}$$

#### Métallurgie → modélisation des transformations de phase

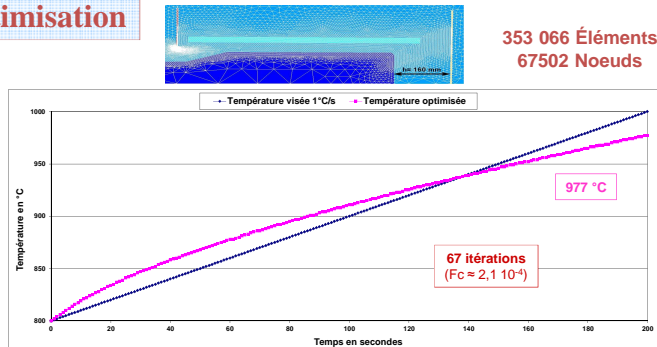
### Structure de l'outil numérique 3D



### Module d'optimisation



Optimiser la fréquence et la densité de courant à injecter pour obtenir une montée en température de 1°C/s →



#### Production scientifique (publications, brevets)

Logiciel Matelec commercialisé par Transvalor avec Forge

R. NAAR, F. BAY, Numerical optimisation for induction heat treatment processes, *Applied Mathematical Modelling*, 37, pp. 2074-2085, 2012

F. BAY, Modelling and control of induction heating processes, coupling optimization algorithms and finite element models, *Sixth Japan-France Seminar on Materials Processing under Magnetic Field*, colloque joint CNRS/Japan Society for Science, Hakone, Japan, May 2010 Invited Lecture

F. BAY, D. CARDINAUX, R. NAAR, Numerical Analysis and Optimisation of Electromagnetic Couplings in Solid Mechanics, *CSF-10 The Tenth International Conference on Computational Structures Technology*, Valencia, Spain, September 2010, Invited Lecture

F. BAY, L. ARBAOUI, R. NAAR 3-D modeling and optimization of induction heating processes: some computational issues, *Numerical Electromagnetics and Applications*, 25-28 October 2011, Santiago de Compostela, Spain, Invited Lecture

D. CARDINAUX, F. BAY A Three-Dimensional Finite Element method for induction heat treatment computation involving moving parts, *6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*, Dresden, October 2009

Y. NEAU, B. PAVA, B. DE-KEPPER, D. CARDINAUX, F. BAY, Computational modelling of induction heating of a square billet using different numerical approaches, *HES-10, International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources*, Padua, Italy, May 19-21, 2010

R. NAAR, D. CARDINAUX, F. BAY, Induction Heating Processes: 3D Modeling and Optimisation, *ESAFORM 2011*, Belfast, U.K. 27-29 April 2011

R. NAAR, F. BAY, Modelling and Optimisation of induction heating processes, *Septième Conférence européenne sur les méthodes numériques en électromagnétisme*, NUMELEC 2012, Marseille, Juillet 2012

#### CONTACT :

François Bay  
francois.bay@mines-paristech.fr

