



Club Cast3M

-

Couplage thermique – thermohydraulique

TACTICS



Quentin Le Coz, Benoît Lacroix, François Nunio,

Roser Vallcorba, Louis Zani

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

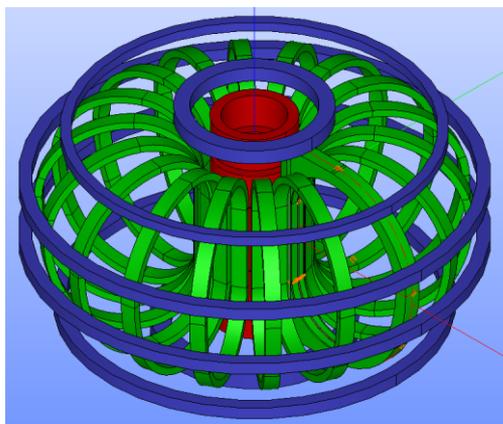


www.cea.fr

29 Novembre 2019

- **Introduction**
 - Systèmes magnétiques d'un tokamak & câble en conduit
- **Codes de calcul**
 - Thermique et thermohydraulique
- **Couplage thermique-thermohydraulique (TACTICS)**
 - Présentation de la méthodologie
 - Mise en œuvre dans Cast3M
- **Cas applicatifs**
 - DEMO 2018 – scénario opérationnel : burn plasma
 - DEMO 2015 – scénario incidentel : quench (transitoire rapide)
- **Projet OLYMPE : plateforme multiphysique**
- **Conclusion & perspectives**

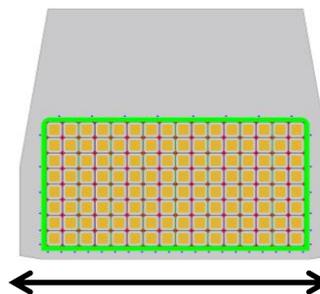
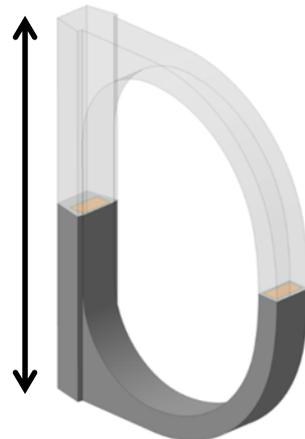
- **Introduction**
 - Systèmes magnétiques d'un tokamak & câble en conduit
- **Codes de calcul**
 - Thermique et thermohydraulique
- **Couplage thermique-thermohydraulique (TACTICS)**
 - Présentation de la méthodologie
 - Mise en œuvre dans Cast3M
- **Cas applicatifs**
 - DEMO 2018 – scénario opérationnel : burn plasma
 - DEMO 2015 – scénario incidentel : quench (transitoire rapide)
- **Projet OLYMPE : plateforme multiphysique**
- **Conclusion & perspectives**



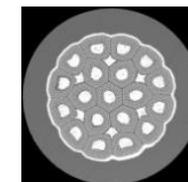
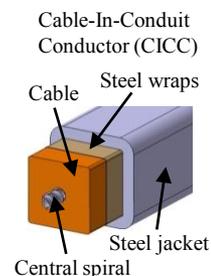
Systèmes magnétiques :

- Toroidal Field (TF) coils
- Poloidal Field (PF) coils
- Central Solenoid (CS)

~ 15 m



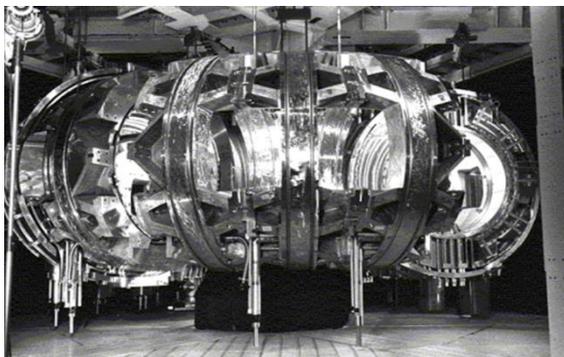
~ 1.5 m



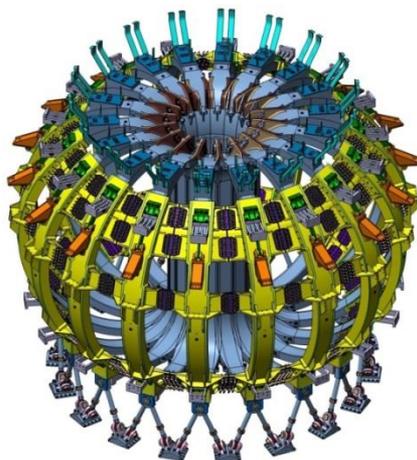
~ 1 mm

➤ Analyse multi-échelle

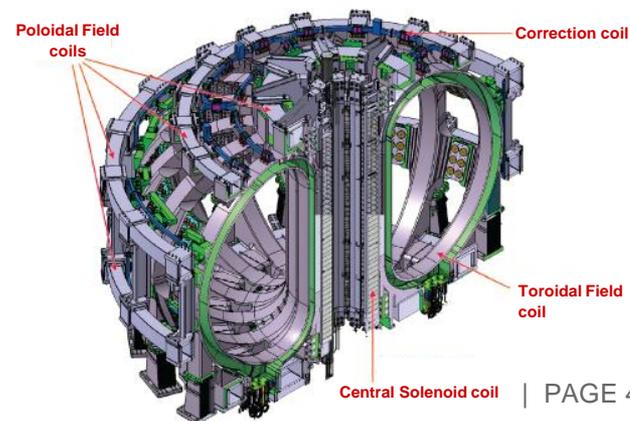
Tore Supra - 1988



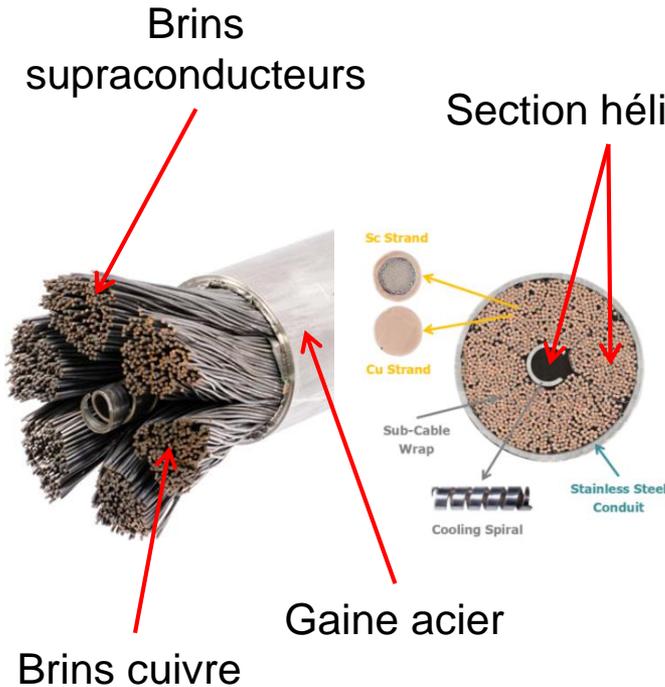
JT-60SA - 2020



ITER – 2025



Cable-In-Conduit Conductors (CICC)



- Brins supraconducteurs : NbTi ou Nb₃Sn
Transport du courant
- Brins cuivres
Stabilité, protection en cas de quench
- Section hélium
Refroidissement : spirale centrale + bundle (void fraction ~ 30 %)
- Gaine en acier
Étanchéité hélium, tenue mécanique

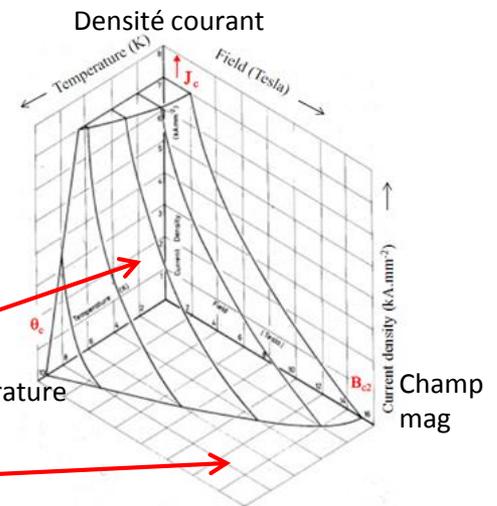
Critère de dimensionnement

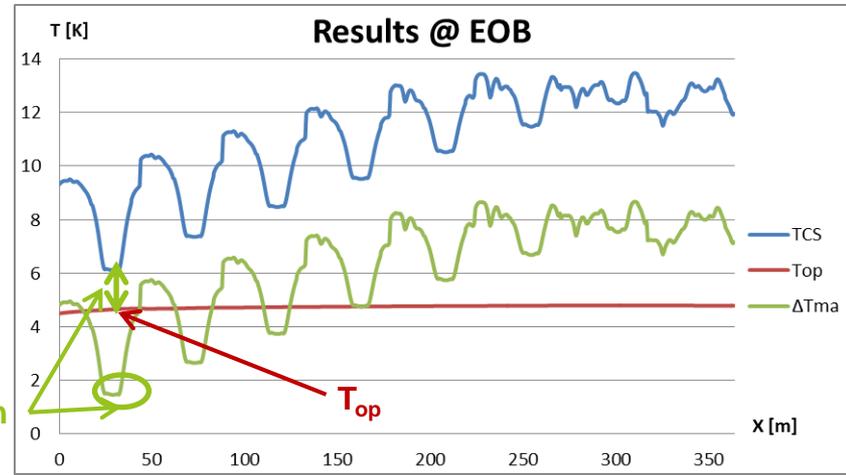
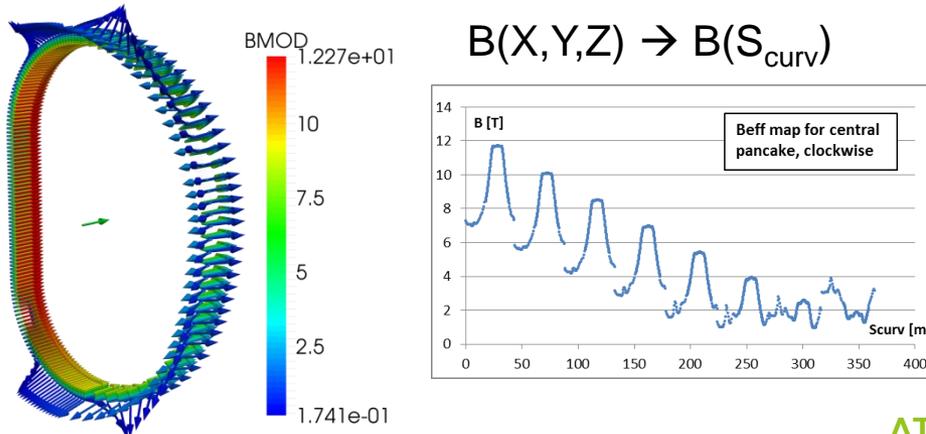
Opération : marge en température : $\Delta T_{ma} = T_{CS} - T_{op} > \sim 1 \text{ K}$

Quench : température de hotspot (T_{max} gaine) : $T_{hotspot} < 150 \text{ K}$

Electromagnétique Thermique

↑
Cuivre





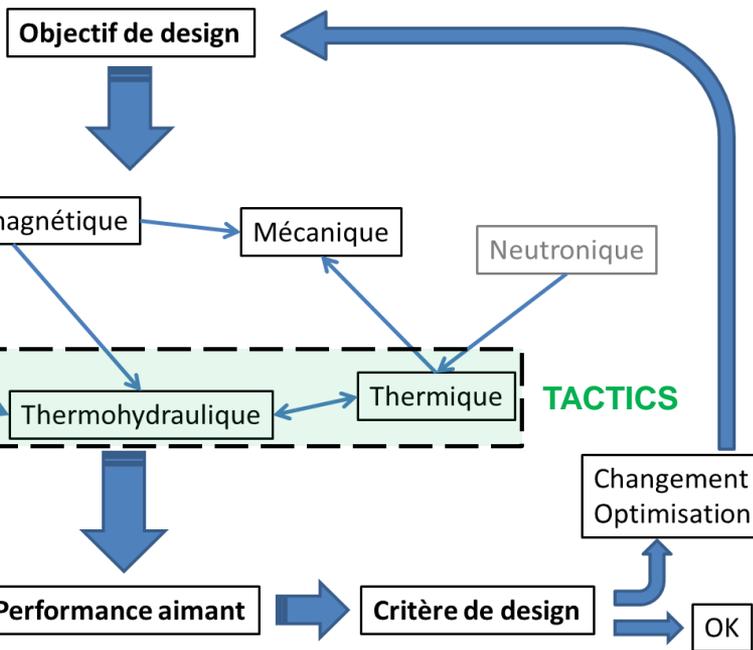
T_{CS} : température de « current sharing » = $f(B,J)$

T_{op} : température d'opération

Marge en température :

$$\Delta T_{ma} = T_{CS} - T_{op}$$

➤ Analyses multi-physiques

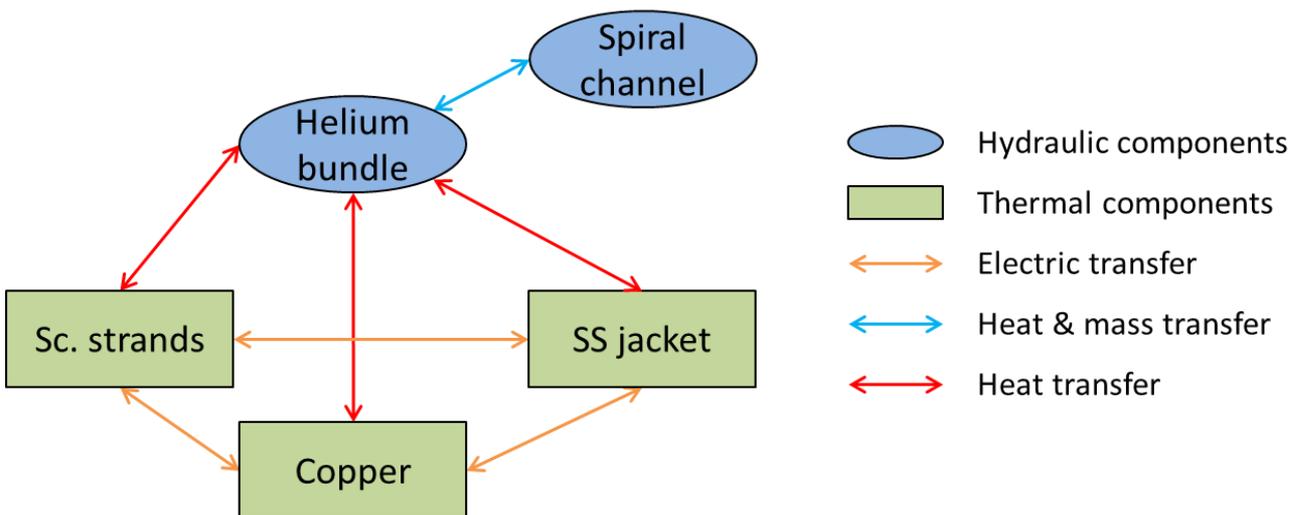
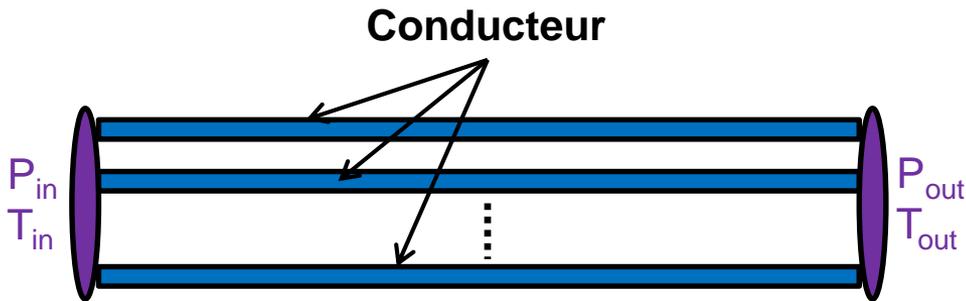


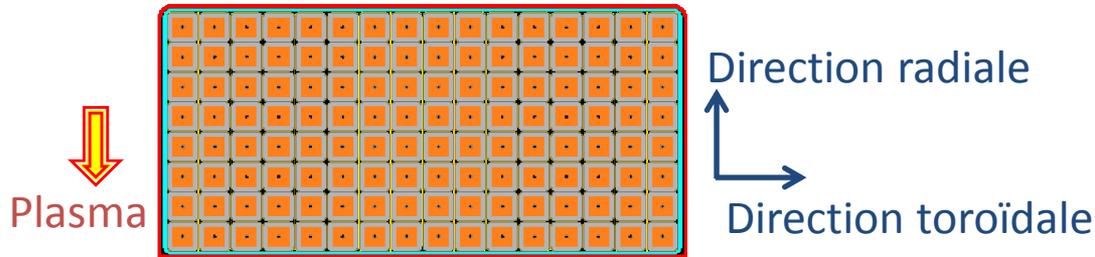
- **Introduction**
 - Systèmes magnétiques d'un tokamak & câble en conduit
- **Codes de calcul**
 - Thermique et thermohydraulique
- **Couplage thermique-thermohydraulique (TACTICS)**
 - Présentation de la méthodologie
 - Mise en œuvre dans Cast3M
- **Cas applicatifs**
 - DEMO 2018 – scénario opérationnel : burn plasma
 - DEMO 2015 – scénario incidentel : quench (transitoire rapide)
- **Projet OLYMPE : plateforme multiphysique**
- **Conclusion & perspectives**

THEA (CryoSoft)

Code éléments finis 1D transitoire : **T**hermal, **H**ydraulic and **E**lectric **A**nalysis of superconducting cables

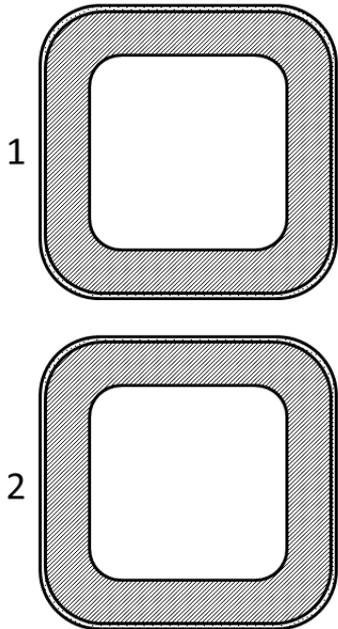
- Température : conduction longitudinale
- Ecoulement de l'hélium
- Transport du courant ; transition supra / résistif





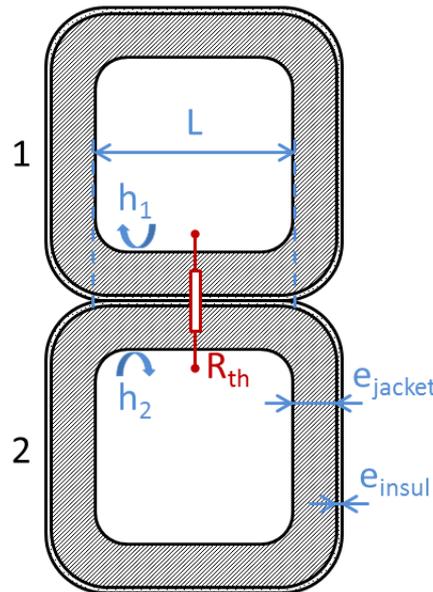
- Le bobinage est fortement couplé thermiquement.
- L'approche 1D est insuffisante si effets transverses importants, ou en transitoire.

THEA : 1D



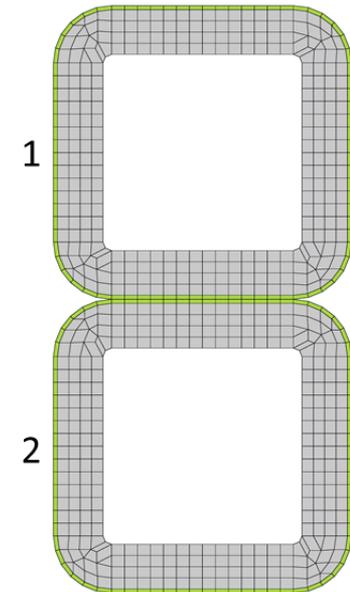
$$\Phi_{tr} = 0$$

Résistance thermique



$$\Phi_{tr} [W/m] = \frac{\Delta T_{helium\ 1\leftrightarrow 2}}{\frac{1}{h_1 * L} + \frac{2 * e_{jacket}}{\lambda_{jacket} * L} + \frac{2 * e_{insul}}{\lambda_{insul} * L} + \frac{1}{h_2 * L}}$$

Modèle éléments finis

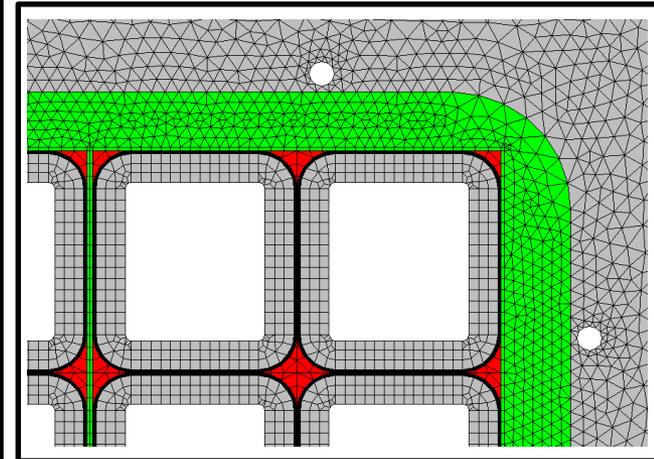
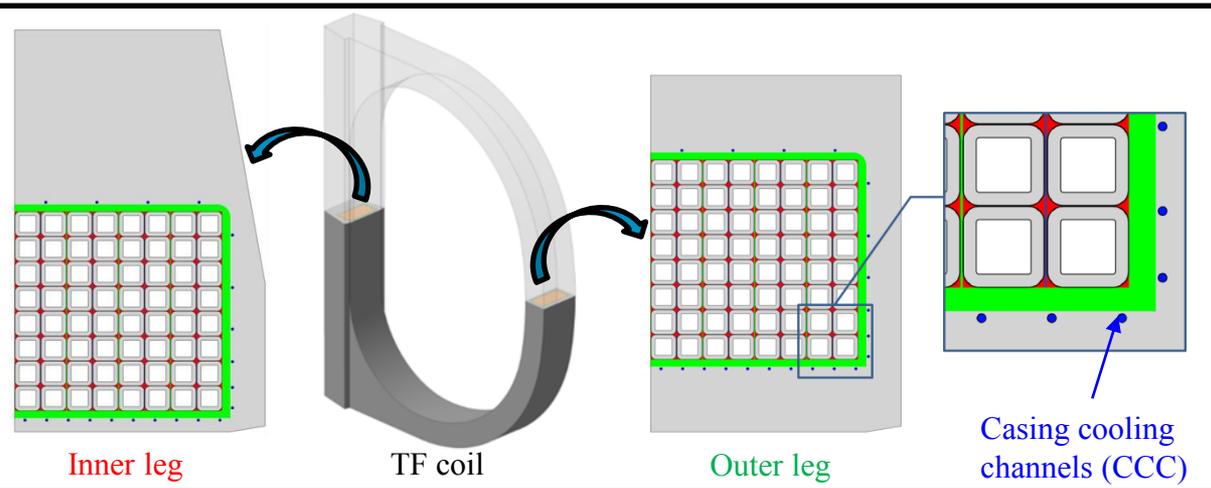
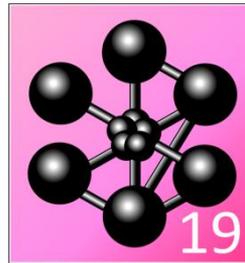


$$\Phi_{tr} \rightarrow FEM$$

Cast3M (code CEA)

Code éléments finis transitoire utilisé pour la **thermique 2D** de sections de bobines.

- Géométrie, maillage.
- Modèles.
- Chargement.
- Initialisation & conditions aux limites (fixe ou co-simulation THEA).

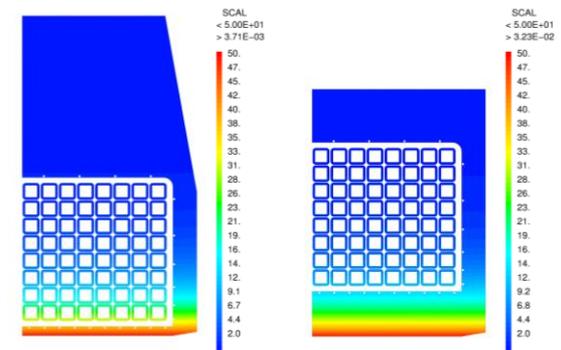


Modèles :

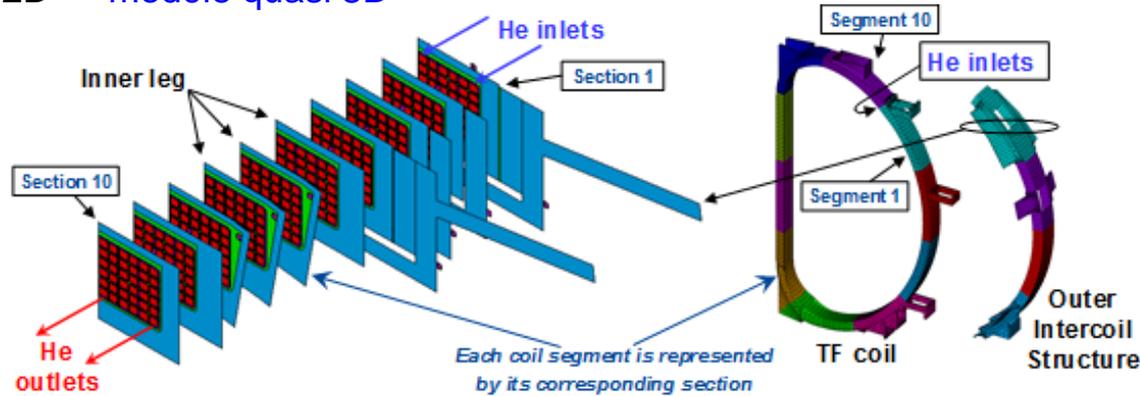
- Conduction isotrope
- Conduction orthotrope (isolation)
- Convection (CL) ?
- Mécanique ?

Exemple de chargement (DEMO)

$$P_{NH} \left[\frac{W}{m^3} \right] = 50 \cdot \exp\left(-\frac{R_{CASE}}{140}\right)$$



- Dimensionnement d'une bobine supraconductrice (critères de marge en température ΔT_{ma} et de température de point chaud $T_{hotspot}$) → **problème** thermohydraulique / thermique 3D
- Approche retenue pour tous les outils existants = TH conducteur en 1D + thermique transverse dans les structures en 2D → **modèle quasi 3D**



**Bobine TF
JT-60SA**

- Codes existants : **SuperMagnet** (THEA/Heater) - CryoSoft (L. Bottura, CERN)
Venecia - Institut EFREMOV & Alphysica (Russie)
4C - Politecnico di Torino (Italie)
- Motivations du développement de TACTICS (THEA 1D + Cast3M 2D) :
 - **Continuer à utiliser THEA** pour la TH 1D du conducteur (code utilisé à l'IRFM, open source) ;
 - Bénéficier des **atouts de Cast3M** :
 - ✓ Ergonomie : meilleur, interface utilisateur ;
 - ✓ Langage évolué (GIBIANE) : description du modèle, mise en œuvre du couplage ;
 - ✓ Disponibilité de l'équipe de développement.
 - Implémentation d'un **code traitant aussi la mécanique**.

- **Introduction**
 - Systèmes magnétiques d'un tokamak & câble en conduit
- **Codes de calcul**
 - Thermique et thermohydraulique
- **Couplage thermique-thermohydraulique (TACTICS)**
 - Présentation de la méthodologie
 - Mise en œuvre dans Cast3M
- **Cas applicatifs**
 - DEMO 2018 – scénario opérationnel : burn plasma
 - DEMO 2015 – scénario incidentel : quench (transitoire rapide)
- **Projet OLYMPE : plateforme multiphysique**
- **Conclusion & perspectives**

TACTICS: THEA-Cast3M-SimCryogenics

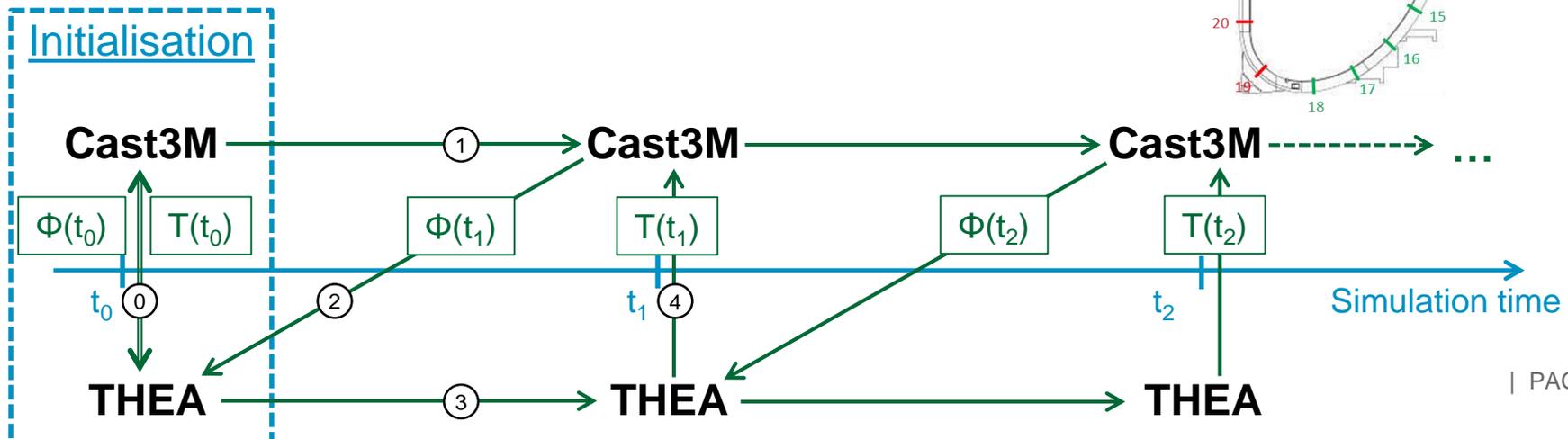
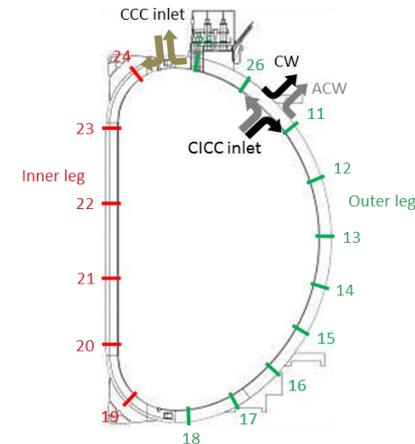
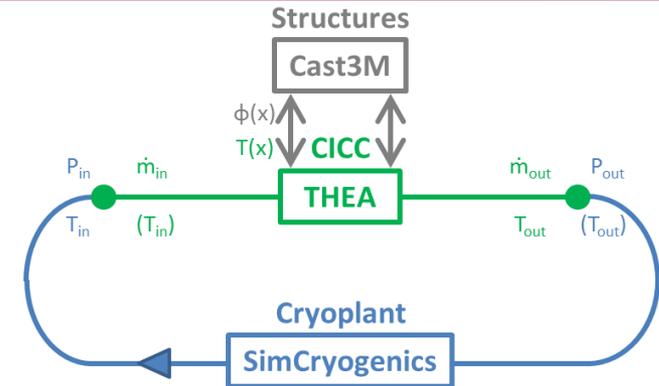
Co-simulation pseudo-3D (transitoire) :

- **THEA** pour la thermohydraulique conducteur 1D.
- **Cast3M** EF 2D pour la thermique transverse.
- **SimCryogenics** (CEA/DSBT) pour la cryodistribution.

Objectifs :

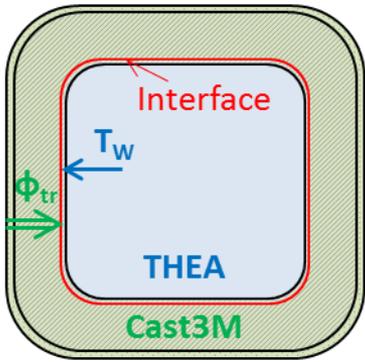
- Modélisation des échanges boîtier / bobinage.
- Couplage thermique inter-tour / inter-pancake.

Le couplage se fait par un schéma temporel explicite.
Les données sont échangées par des fichiers textes.



Conditions de raccord : le couplage se fait sur le contour interne des gaines.

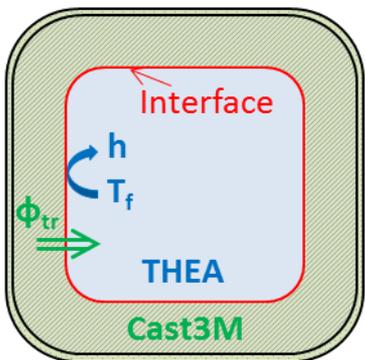
Neumann Dirichlet



Couplage direct

- Instable : faible inertie thermique de la pellicule de gaine dans THEA.
- Impose une température uniforme sur le contour dans Cast3M.

Neumann Fourier

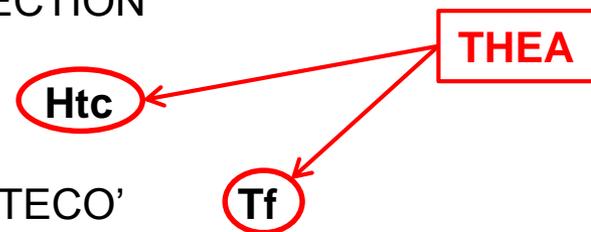


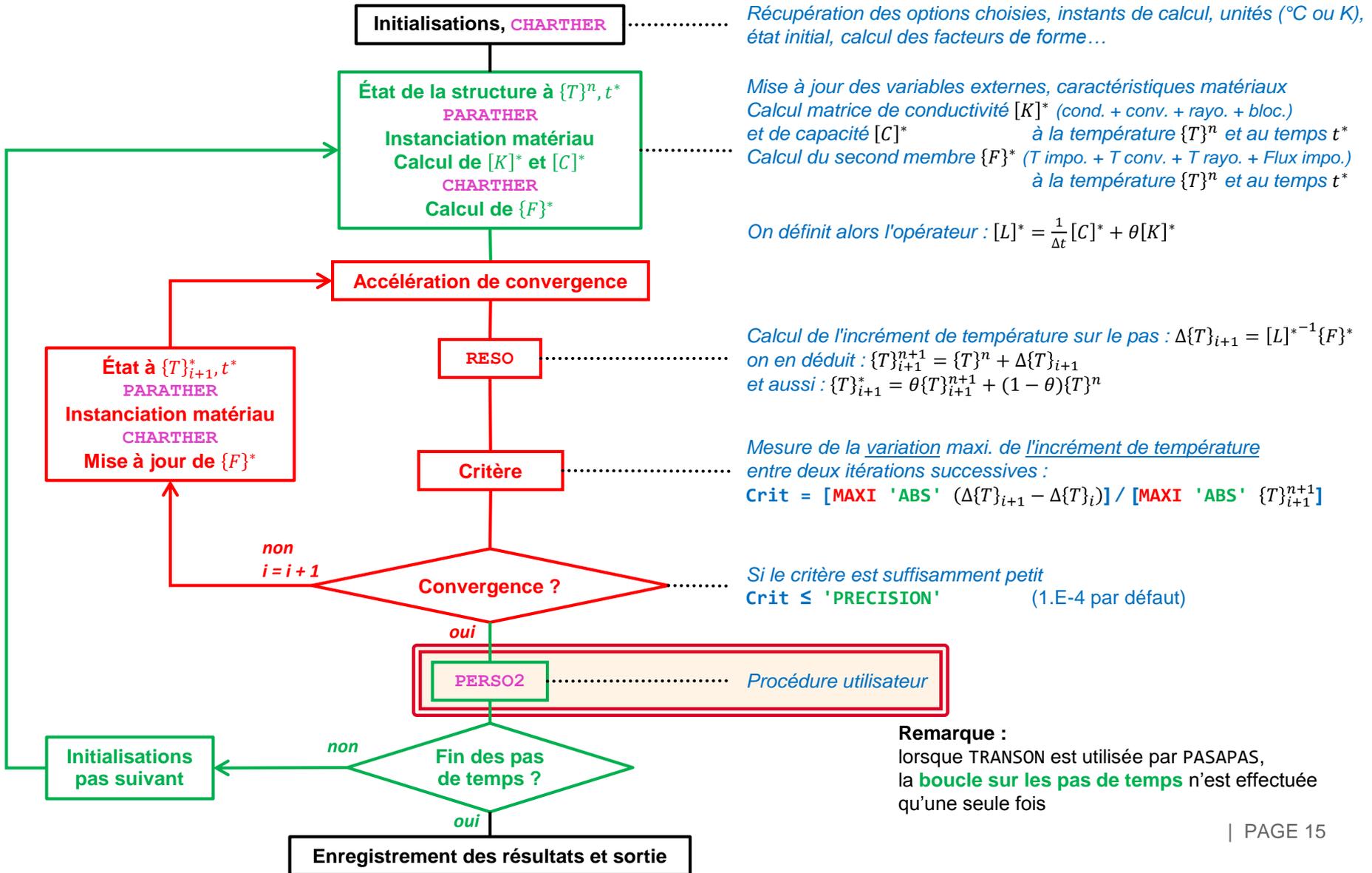
Couplage convectif

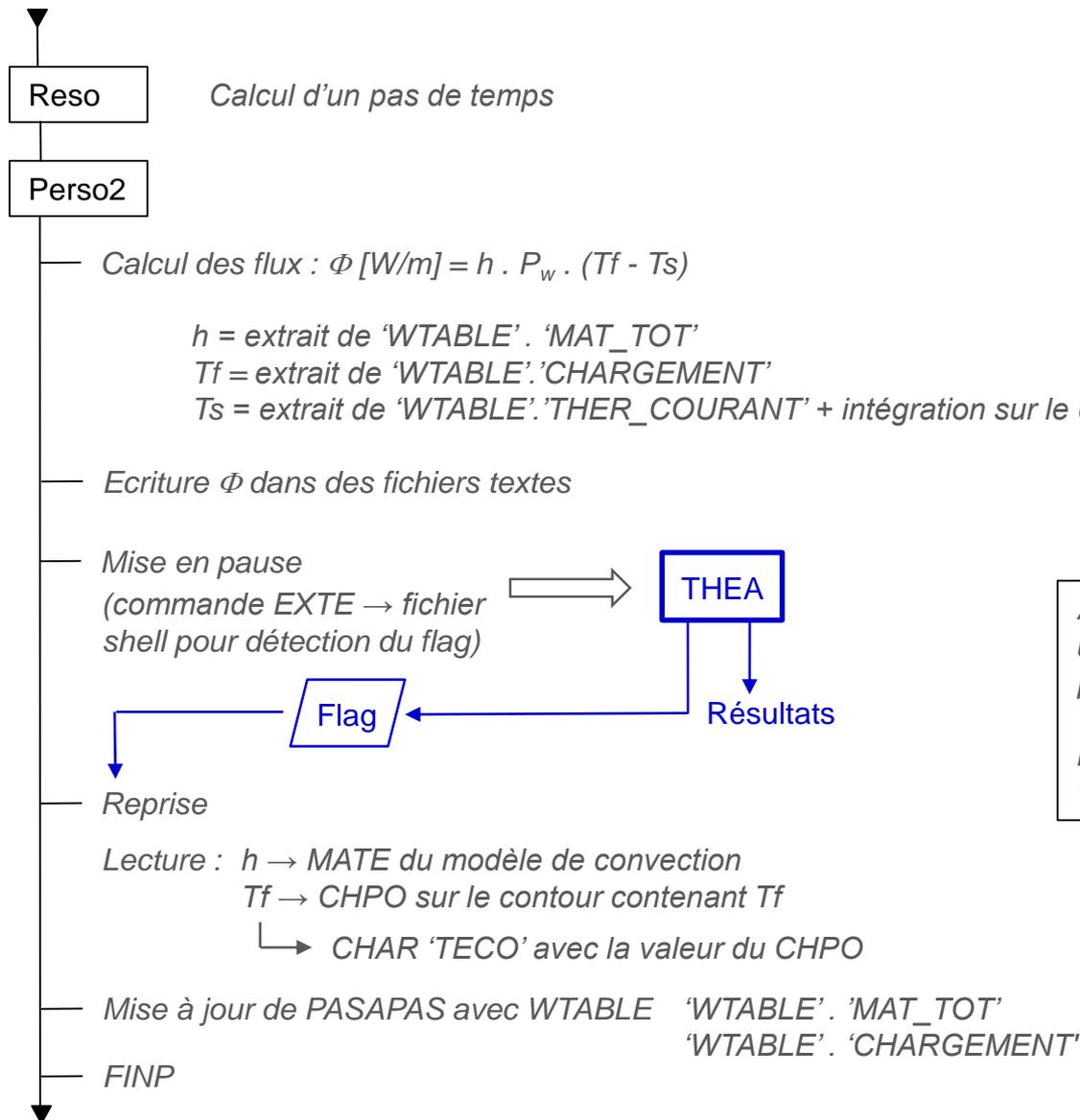
- Numériquement plus robuste -> transitoire rapide (quench).
- Plus réaliste (profil de température non-uniforme sur le contour).

Initialisation :

- Modèle : 'CONVECTION'
- Matériaux : 'H' **Htc**
- Chargement : CHPO 'TECO' **Tf**





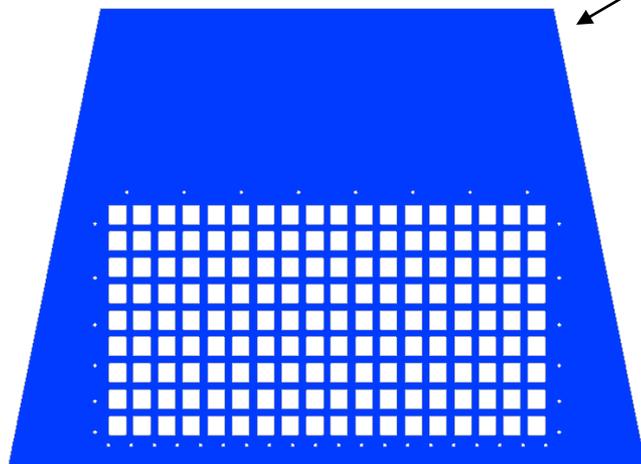
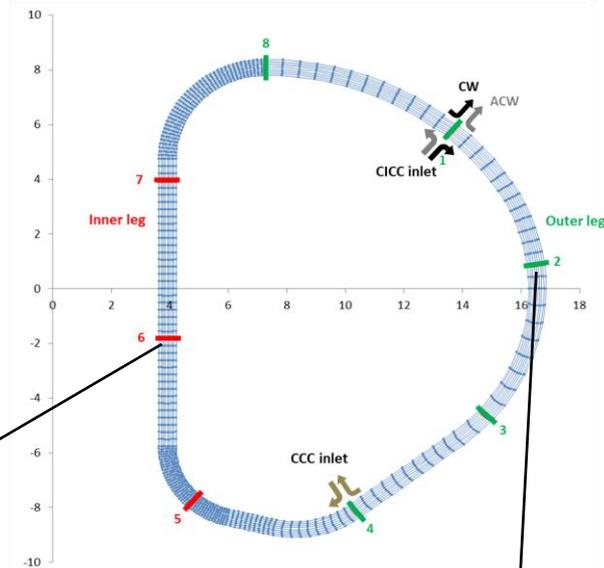


Attention, les indices de PASAPAS utilisés lors de l'initialisation de la table peuvent différer de ceux utilisés dans WTABLE.

Pour le coefficient d'échange h :
 'CARACTERISTIQUES' → 'MAT_TOT'

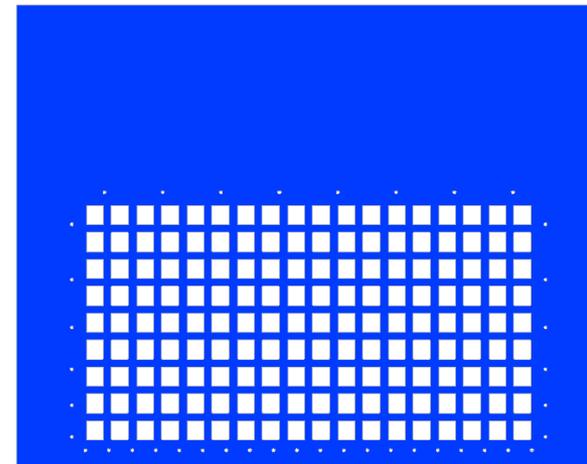
- **Introduction**
 - Systèmes magnétiques d'un tokamak & câble en conduit
- **Codes de calcul**
 - Thermique et thermohydraulique
- **Couplage thermique-thermohydraulique (TACTICS)**
 - Présentation de la méthodologie
 - Mise en œuvre dans Cast3M
- **Cas applicatifs**
 - DEMO 2018 – scénario opérationnel : burn plasma
 - DEMO 2015 – scénario incidentel : quench (transitoire rapide)
- **Projet OLYMPE : plateforme multiphysique**
- **Conclusion & perspectives**

- Simulation de **2 h burn** + 10 minutes dwell.
- **8 sections transverses Cast3M**: **3 en jambe interne** et **5 sur la jambe externe**.
- **18 conducteurs + 40 CCC THEA** avec inversion du sens de circulation de l'hélium d'une galette à une autre.



T
< 4.50E+00
> 4.50E+00

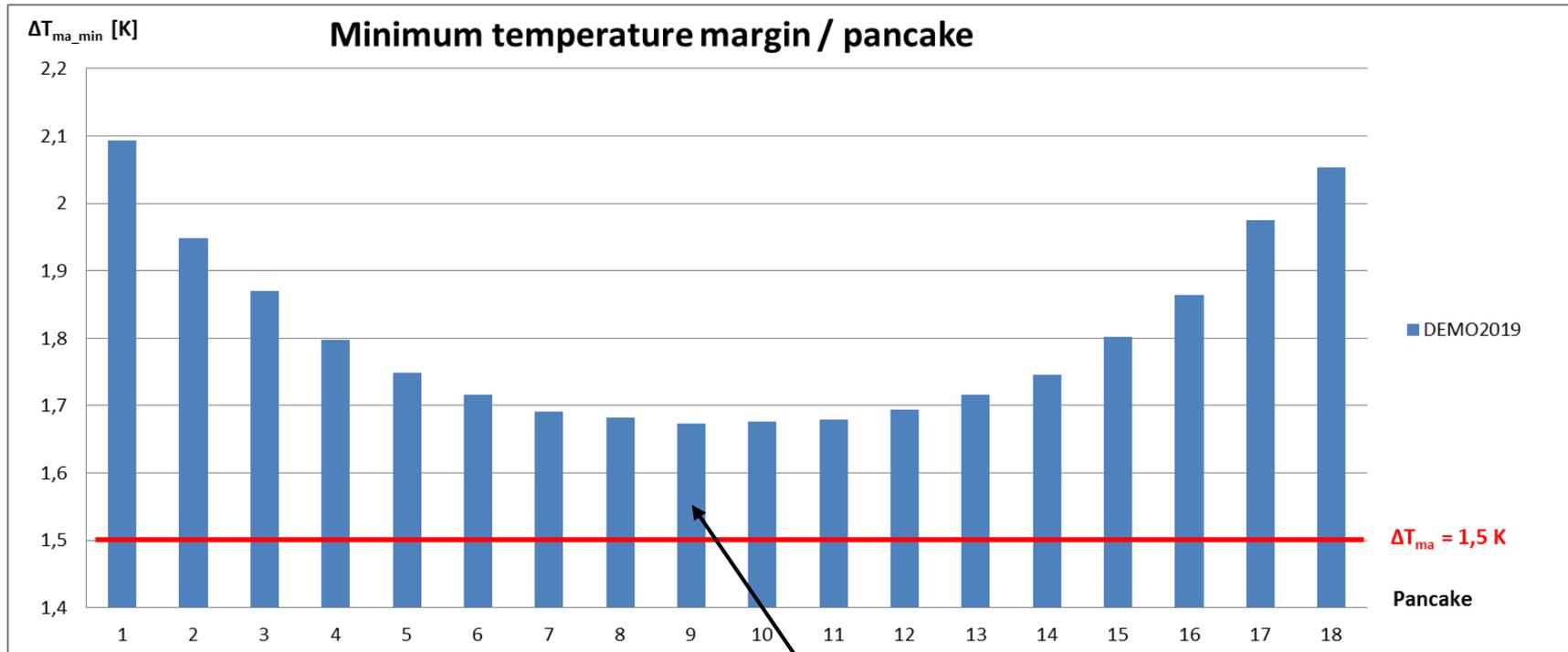
7.3
7.1
6.9
6.6
6.4
6.1
5.9
5.6
5.4
5.1
4.9
4.6



T
< 4.50E+00
> 4.50E+00

6.3
6.1
6.0
5.8
5.7
5.5
5.4
5.2
5.0
4.9
4.7
4.6

Time = 0.0000 s



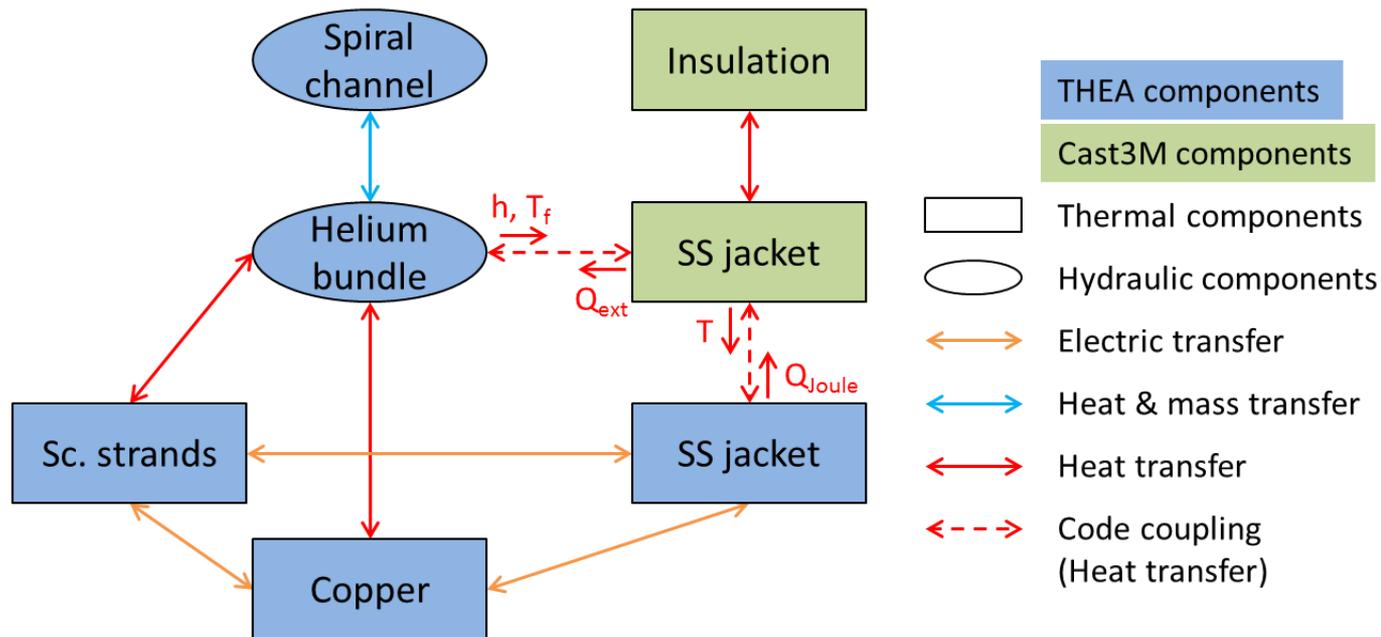
Galette critique = median ACW (#9) - $\Delta T_{ma} = 1.67$ K

Temperature margin criterion: $\Delta T_{ma} = T_{CS} - T_{op} > 1.5$ K

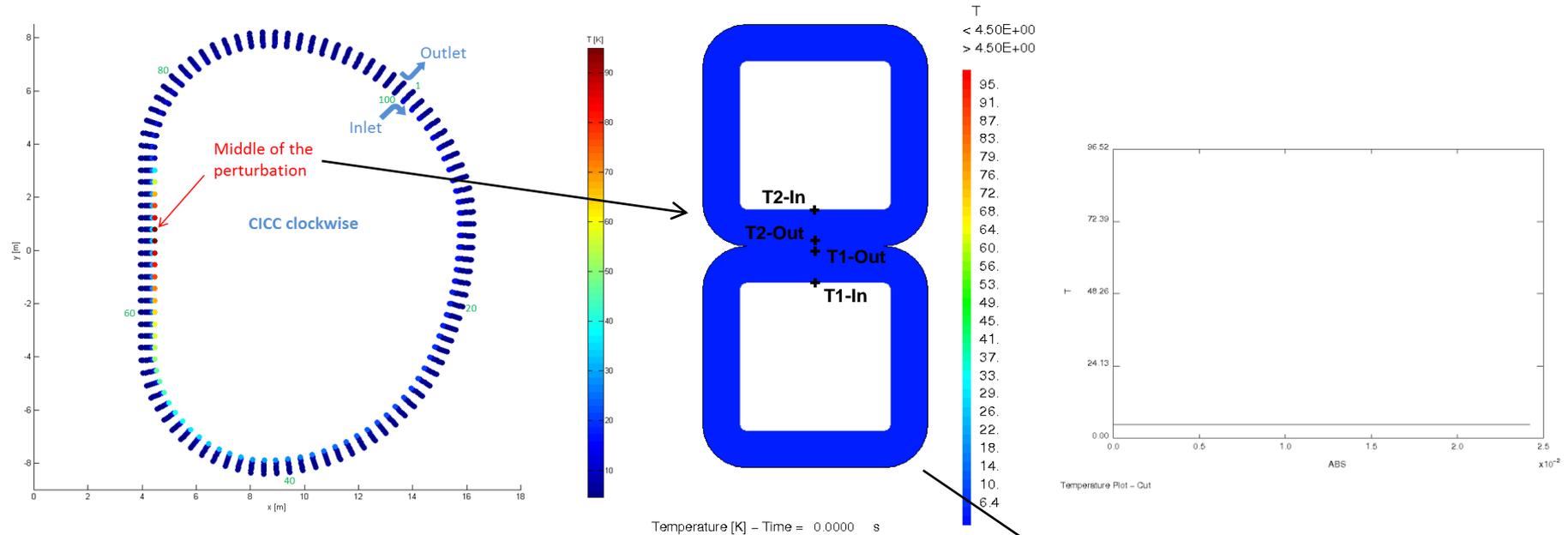


Le conducteur est surdimensionné (marge visée = 1,5 K), le design sera optimisé par la suite.

- Quench : transition irréversible de l'état supraconducteur à l'état résistif.
- Causes possibles : disruption, vieillissement du conducteur, incident cryogénique...
- Dépôt d'énergie très important par effet Joule.
- Risque de dommages irréversibles à l'aimant en cas de défaillance de la détection.
 - échauffement local excessif → $T_{hot\ spot} < 150\ K$
 - surpression

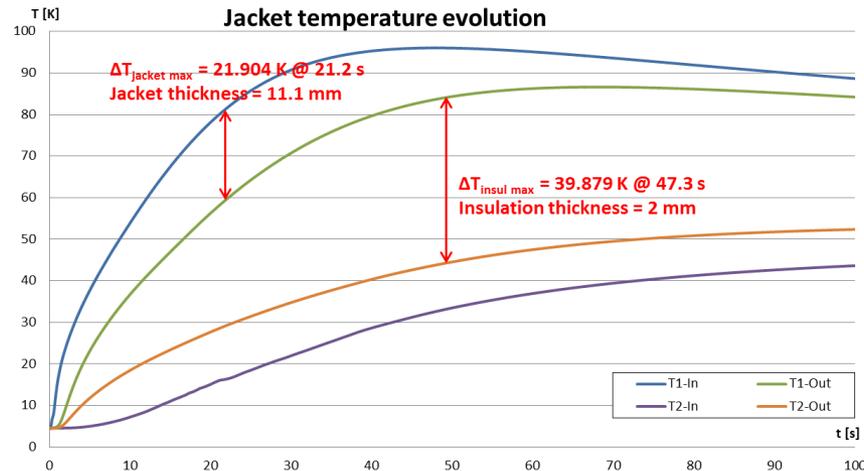


La gaine est considérée "thermiquement" dans Cast3M et "électriquement" dans THEA pour pouvoir tenir compte de la redistribution de courant lors d'un quench.



Temperature [K] - Time = 0.0000 s

Champ de température dans les 100 sections transverses à 100s.



Carte de température de la gaine + isolant des 2 premiers tours de la galettes au milieu de la zone d'initiation du quench.

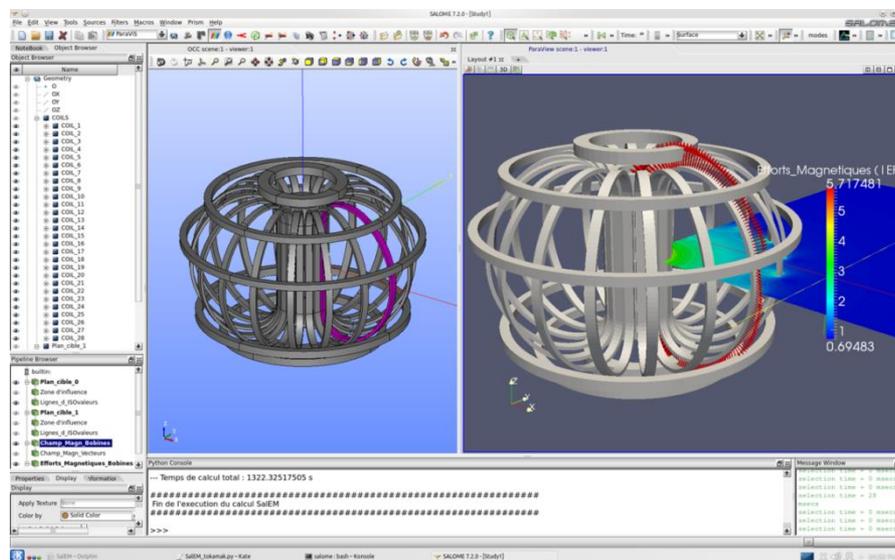
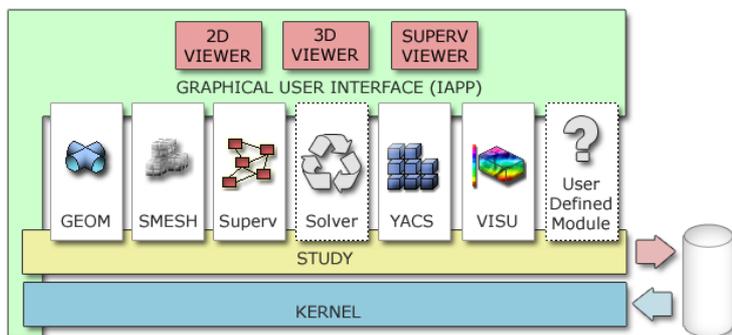
Les cartographies de température issues de cette étude serviront de données d'entrées aux analyses mécaniques (simulations Cast3M - IRFU).

- **Introduction**
 - Systèmes magnétiques d'un tokamak & câble en conduit
- **Codes de calcul**
 - Thermique et thermohydraulique
- **Couplage thermique-thermohydraulique (TACTICS)**
 - Présentation de la méthodologie
 - Mise en œuvre dans Cast3M
- **Cas applicatifs**
 - DEMO 2018 – scénario opérationnel : burn plasma
 - DEMO 2015 – scénario incidentel : quench (transitoire rapide)
- **Projet OLYMPE : plateforme multiphysique**
- **Conclusion & perspectives**

Plateforme OLYMPE développée sous
SALOME (Co-développé par le CEA + EDF)

Plateforme multiphysique (Python)

- CAO
- Maillage
- Post-traitement (Paravis)
- Intégration de solveurs
- Couplage de code
- Supervision



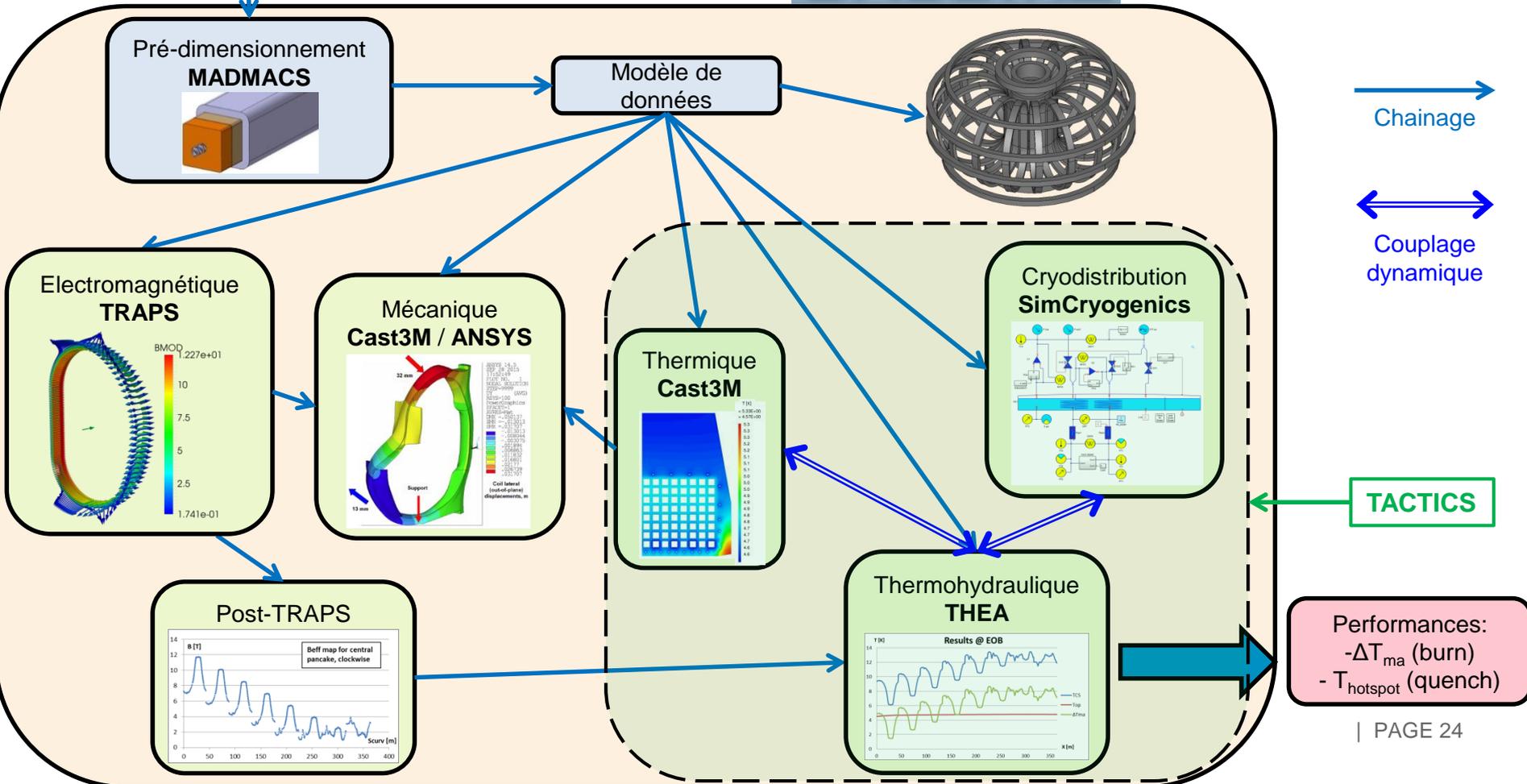
Codes systèmes :
-PROCESS
-Sycomore

Chargements thermiques

SALOME

Objectifs d'OLYMPE :

- Intégration
- Interfaçage
- Supervision



- **Introduction**
 - Systèmes magnétiques d'un tokamak & câble en conduit
- **Codes de calcul**
 - Thermique et thermohydraulique
- **Couplage thermique-thermohydraulique (TACTICS)**
 - Présentation de la méthodologie
 - Mise en œuvre dans Cast3M
- **Cas applicatifs**
 - DEMO 2018 – scénario opérationnel : burn plasma
 - DEMO 2015 – scénario incidentel : quench (transitoire rapide)
- **Projet OLYMPE : plateforme multiphysique**
- **Conclusion & perspectives**

- Le dimensionnement des grands aimants de fusion requiert la mise en œuvre de **modèles quasi 3D couplant thermique et thermohydraulique**.
- **Besoin de souplesse et de précision** pour la conception de nouveaux systèmes cryo-magnétiques → développement du coupleur **THEA-Cast3M : TACTICS**.
- Plusieurs applicatifs ont été réalisés, notamment sur l'aimant TF de DEMO (→ **2 publications**) :
 - Scenarios d'opération nominale (burn) [1] ;
 - Transitoires incidentels (quench) [2].
- L'outil de couplage TACTICS inclut également le code de modélisation de la **cryodistribution : SimCryogenics** (CEA/DSBT).
- TACTICS et plusieurs autres codes de dimensionnement des aimants de fusion sont en cours d'intégration dans une **plateforme multi-physique unifiée : OLYMPE**.
- Perspectives d'applications :
 - En cours : JT-60SA (test des bobines en station d'essais) ;
 - A venir : JT-60SA (en configuration tokamak), ITER ;
 - Envisagées : CFETR (Chine), aimants d'accélérateurs.

[1] Q. Le Coz, et al., Towards a multi-physic platform for fusion magnet design - Application to DEMO TF coil, Fusion Eng. Des. (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.076>

[2] Q. Le Coz, et al., Quench simulation of a DEMO TF coil using a quasi-3D coupling tool, IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol. 28 n°3, Art. n° 4203105 (2018)



Merci de votre attention

Questions ?

Méthode utilisée pour intégrer un CHPO sur une géométrie (contour, surface...) :

MO_F = MODE geo THERMIQUE ISOTROPE ;

MA_F = MATE MO_F 'RHO' 1. ;

LO_F = INTG MA_F MO_F ;

CHEL_F = CHAN CHAM (REDU CHTMP geo) geo ;

INTT = INTG CHEL_F MO_F ;

TMOY = INTT/LO_F ;