

## COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIERE

Département d'Astrophysique, de Physique des Particules,  
de Physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée

**Service Technique de Cryogénie  
et de Magnétisme**

**Rapport technique : 5- 2650N – 1200 001 00**

Date : 20 octobre 2000

Rédacteur : C. Gourdin

Sujet : Nouvelle modélisation mécanique de la partie droite du quadripôle Nb<sub>3</sub>Sn avec CASTEM 2000

Nb. de Pages : 39

Diffusion : A. Dael, A. Devred, M. Durante, C. Gourdin, M. Jacquemet, F.P. Juster, F. Kircher, D. Leboeuf, M. Masson, C. Pes, M. Peyrot, J.M. Rey, M. Reytier, J.M. Rifflet, J. Thinel, F. Trillaud, P. Védrine

### Abstract

One possible application of Nb<sub>3</sub>Sn is the fabrication of short and powerful quadrupole magnets for the crowded interaction regions of large particle accelerators. To learn about Nb<sub>3</sub>Sn technology and evaluate fabrication processes. The DAPNIA/STCM at CEA/Saclay has undertaken an R&D program to design and build a single-aperture quadrupole magnet model with a Nb<sub>3</sub>Sn Rutherford-type cable. Nb<sub>3</sub>Sn can be used either to achieve a high magnetic field gradient in a large aperture or to permit magnet operation in a sizeable background magnetic flux density. The conceptual design of a 1-m-long, 56-mm-single-aperture Nb<sub>3</sub>Sn quadrupole magnet, with a nominal field gradient of 211 T/m at 11870 A and 4.2 K is presented. Then, we report the main results of FE computations performed to optimize the magnet coil pre-stress.

## Table des Matières

<b>I</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>II</b>	<b>Présentation de la conception mécanique</b>	<b>3</b>
<b>III</b>	<b>Pré étude mécanique de la partie droite</b>	<b>5</b>
III.1	Introduction et objectifs	5
I.2	Analyse analytique, estimation de la précontrainte	5
I.3	Historique	7
I.4	Pourquoi une nouvelle modélisation	7
I.5	Le modèle par éléments finis	8
I.6	Les conditions aux limites, surfaces de contact, hypothèses de calculs	10
I.7	Les propriétés des matériaux	12
I.8	Le chargement mécanique	12
I.9	Les résultats des simulations par éléments finis	14
I.1.1	Etude de l'état mécanique optimisé	15
I.1.1.1	Le frettage	15
I.1.1.2	La mise en froid	15
I.1.1.3	La mise sous courant	15
I.1.2	Résumé	16
I.1.3	Influence des tolérances de fabrication	16
I.1.4	Influence de l'ajustement du système de guidage des colliers	16
<b>II</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>17</b>
<b>III</b>	<b>Références</b>	<b>18</b>
<b>IV</b>	<b>Annexes</b>	<b>19</b>

## **I Introduction**

Ce rapport présente la nouvelle modélisation numérique mise en place avec le logiciel de calculs de structures CASTEM2000 [1]. Elle permet de valider et d'optimiser la conception de la partie droite du quadripôle modèle en Nb<sub>3</sub>Sn.

Dans un premier temps, nous allons rappeler les différentes options techniques choisies pour la conception de la partie droite du quadripôle en Nb<sub>3</sub>Sn. Ensuite, à l'aide d'une première approximation analytique, nous déterminerons la valeur de la précontrainte à appliquer lors de la fabrication de l'aimant (frettage) afin de compenser les retraits thermiques différentiels des matériaux utilisés et d'assurer une reprise efficace des efforts de Lorentz (minimisation des déformations de la bobine).

Nous rappellerons l'historique de la modélisation mécanique par éléments finis de la partie droite d'aimants quadripolaires au STCM. Puis, nous décrirons dans le détail, le nouveau modèle par éléments finis mis en place, les hypothèses de calcul, les caractéristiques mécaniques et les conditions aux limites utilisées.

Les résultats significatifs seront présentés et discutés. Enfin, nous conclurons sur les perspectives et évolutions possibles de ce modèle numérique.

## **II Présentation de la conception mécanique**

Le quadripôle modèle, d'une longueur d'1 mètre (longueur magnétique), est constitué d'une seule ouverture d'un diamètre intérieur de 56 mm. Les bobines sont constituées de deux couches de conducteurs de géométrie identique à celle des bobines des quadripôles NbTi du LHC [2].

L'isolation électrique du conducteur est assurée par un guipage avec un ruban de fibres de Silice Standard désensimé. Ce guipage est réalisé en superposant deux couches de ruban bobinées bord à bord (pas constant) décalée d'une demi largeur de ruban l'une par rapport à l'autre.

Les cales angulaires seront fabriquées (par étirage) dans un alliage composé de Cuivre (89%), d'Aluminium (10%) et de Fer (1%). La dénomination de cet alliage est C95300 (alliage d'Aluminium Bronze). Cet alliage résiste aux températures nécessaires à la mise en œuvre du Nb<sub>3</sub>Sn (660°C pendant 240 heures).

Contrairement aux bobines en NbTi, une cale polaire sera insérée de manière permanente dans le bobinage. Cette cale fait partie intégrante de la bobine. Elle sera constituée du même matériau que les cales angulaires (Alliage d'Aluminium Bronze). Elle devra assurer un guidage (centrage) des colliers par rapport aux bobines par l'intermédiaire d'un doigt. L'étude d'un jeu de fonctionnement (ajustement dur ou libre) est étudié afin d'améliorer le profil de la contrainte azimutale dans la bobine.

Le document référencé 5-2650N – 1500 004 99 décrit dans le détail la gamme de fabrication des bobines [3].

Les bobines sont maintenues mécaniquement entre elles par des colliers de freinage en acier austénitique, dont le diamètre extérieur est de 174 mm.

Les colliers ont la même géométrie extérieure que les colliers utilisés pour les quadripôles en NbTi. Le freinage sera assuré par l'intermédiaire de huit clavettes et seize lardons. Les colliers

doivent reprendre les efforts de Lorentz et assurer un bon positionnement des conducteurs en fonctionnement en minimisant les déformations de la bobine.

L'ensemble fretté (bobines & colliers) est placé dans un tube d'inertie qui assure l'alignement et la rigidité axiale du quadripôle modèle et sert aussi d'enceinte Hélium.

La figure suivante (cf. Figure 1) illustre la section de la partie droite du quadripôle modèle en Nb<sub>3</sub>Sn.

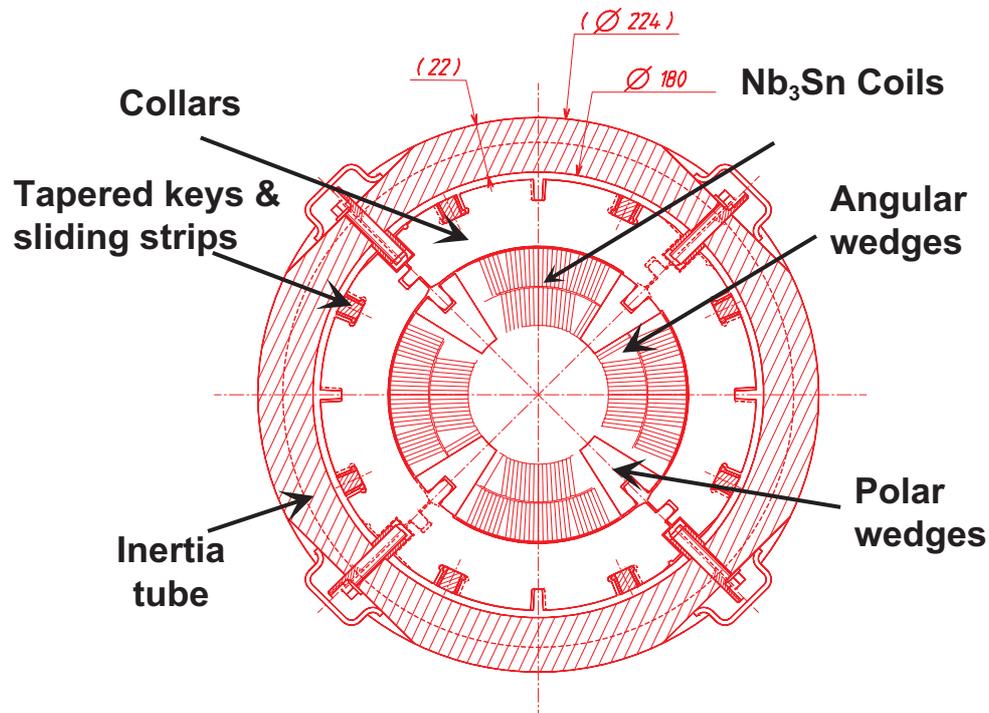


Figure 1 : Coupe de la partie droite du quadripôle modèle, d'après J. Thinel

Les dimensions du conducteur en Nb<sub>3</sub>Sn sont identiques aux dimensions du conducteur en NbTi utilisé pour le quadripôle LHC. Elles sont résumées dans le tableau suivant :

	Conducteur isolé	Conducteur seul	Isolation électrique (ruban de fibres de Silice Standard)
Epaisseur moyenne (sous $\sigma$ : 50 MPa)	1.7 mm	1.46 mm	0.060 mm
Angle de Keystone	0.9°	0.9°	
Largeur	15.36	15.1mm	
Nombre de couches			2

Tableau 1 : Dimensions du câble supraconducteur

### **III Pré étude mécanique de la partie droite**

#### **III.1 Introduction et objectifs**

L'analyse mécanique de la partie droite du quadripôle Nb<sub>3</sub>Sn va nous permettre de vérifier et de valider certains choix technologiques pris pour la conception de l'aimant. De plus, le principe d'application de la précontrainte est différent de celui utilisé pour les quadripôles en NbTi du LHC. La précontrainte sera appliquée par l'intermédiaire d'une différence de rayon entre les colliers et les bobines contrairement aux quadripôles en NbTi, ou l'insertion d'un doigt polaire possédant les dimensions adéquates permet de pré-contraindre les bobines. Ce principe de frettage devra être validé.

Validation des choix technologiques pris par :

- La validation de l'utilisation d'une cale polaire insérée dans le bobinage de manière permanente,
- La validation du principe de positionnement des colliers par rapport aux bobines ainsi que la détermination du jeu de fonctionnement.

Validation du principe de frettage par une différence de rayon entre les colliers et les bobines par :

- S'assurer que la distribution de la contrainte dans le bobinage est acceptable (en terme de gradient et de valeurs maximum),
- Limitation de l'effort transverse (ou azimutal) sur le câble en Nb<sub>3</sub>Sn. En effet, pour des raisons de propriétés électromagnétiques, notamment en terme de courant critique, il est indispensable de limiter la contrainte maximum sur le câble à 150 MPa durant tout le processus et le fonctionnement de l'aimant.
- S'assurer qu'il sera possible d'utiliser pendant le frettage les outillages disponibles au STCM (efforts sur les clavettes durant l'insertion des clavettes),
- Limiter la plasticité dans les différents composants de l'aimant (notamment dans les colliers),

Enfin, une étude des déformations induites par le processus de fabrication, par le refroidissement et par les efforts de Lorentz va nous permettre de déterminer les dimensions de fabrication (dimensions des bobines prêtes à être assemblées) ainsi que les tolérances sur ces dimensions admissibles.

#### **III.2 Analyse analytique, estimation de la précontrainte**

Le cycle de fonctionnement d'un aimant supraconducteur comporte trois phases principales : la fabrication, le refroidissement et la mise sous courant.

Au cours de ces phases, l'état mécanique de l'aimant évolue. Les efforts de Lorentz et les retraits thermiques différentiels des différents matériaux ont tendance à engendrer des variations de contraintes importantes. Ces variations doivent être prises en compte lors la conception de l'aimant. En effet, un déchargement mécanique du bobinage peut avoir des conséquences désastreuses sur les performances de l'aimant. Des mouvements de conducteurs peuvent apparaître et provoquer un échauffement local responsable d'une instabilité de l'aimant en fonctionnement (en cas de transition), ou, pire encore, les bobines ne sont plus

maintenues mécaniquement, et cela modifie la configuration électromagnétique de manière dramatique et altère l'intégrité même de l'aimant.

Le frettage permet d'imposer une précontrainte azimutale de compression. Il est possible d'estimer la valeur de la précontrainte moyenne nécessaire  $\sigma_{\text{bobine}}$  à appliquer lors de l'assemblage afin de compenser les variations de contrainte et d'éviter un déchargement mécanique de la bobine. La valeur de la précontrainte moyenne s'exprime en tenant compte des retraits thermiques moyens des matériaux utilisés pour les colliers et les bobines, ainsi que les valeurs moyennes des composantes des efforts de Lorentz, telle que :

$$\sigma_{\text{bobine}} \approx - E_{\text{bobine}} \left( \int_2^{300} \alpha_{\text{bobine}} dT - \int_2^{300} \alpha_{\text{collier}} dT - \frac{2}{3} \frac{F_{\theta}}{w_{\text{bobine}}} \right)$$

$E_{\text{bobine}}$  représente le module d'élasticité de la bobine suivant la direction azimutale.  $\alpha_{\text{bobine}}$  et  $\alpha_{\text{collier}}$  sont les coefficients de retrait thermique de la bobine et des colliers.  $F_{\theta}$  et  $w_{\text{bobine}}$  caractérisent, respectivement, la valeur moyenne de la composante des efforts de Lorentz (suivant la direction azimutale) et l'épaisseur moyenne de la bobine.

La configuration électromagnétique utilisée pour le quadripôle modèle génère une composante moyenne azimutale des efforts de Lorentz de l'ordre de  $-300$  kN/m pour la couche intérieure et de  $-464$  kN/m pour la couche extérieure.

L'estimation de la valeur de la précontrainte azimutale à appliquer lors de l'assemblage dépend aussi de la marge de sécurité (valeur de contrainte résiduelle de sécurité = 10 MPa) et d'un effet de relaxation après le frettage (de l'ordre de 20%).

Soit pour la couche intérieure (module à chaud : 300K) :

$$\sigma_{\text{bobine}} \approx \left( - 30 \text{ GPa} * \left( 3.9 \text{ ‰} - 3.0 \text{ ‰} - \frac{2}{3} \frac{293.43 \text{ kN/m}}{15.4 \text{ mm}} \right) - 10 \text{ MPa} \right) * 1.2 = -63.2 \text{ MPa}$$

Et pour la couche externe (module à chaud : 300K) :

$$\sigma_{\text{bobine}} \approx \left( - 30 \text{ GPa} * \left( 3.9 \text{ ‰} - 3.0 \text{ ‰} - \frac{2}{3} \frac{463.75 \text{ kN/m}}{15.4 \text{ mm}} \right) - 10 \text{ MPa} \right) * 1.2 = -72 \text{ MPa}$$

Soit pour la couche intérieure (module à froid : 4.2K):

$$\sigma_{\text{bobine}} \approx \left( - 42 \text{ GPa} * \left( 3.9 \text{ ‰} - 3.0 \text{ ‰} - \frac{2}{3} \frac{293.43 \text{ kN/m}}{15.4 \text{ mm}} \right) - 10 \text{ MPa} \right) * 1.2 = -77.6 \text{ MPa}$$

Et pour la couche externe (module à froid : 4.2K):

$$\sigma_{\text{bobine}} \approx \left( - 42 \text{ GPa} * \left( 3.9 \text{ ‰} - 3.0 \text{ ‰} - \frac{2}{3} \frac{463.75 \text{ kN/m}}{15.4 \text{ mm}} \right) - 10 \text{ MPa} \right) * 1.2 = -86.4 \text{ MPa}$$

Si le renforcement du module d'élasticité en fonction de la température est pris en compte, il est nécessaire d'imposer une **précontrainte azimutale moyenne de 86.4 MPa**. Cette valeur est relativement importante pour l'assemblage du quadripôle.

### III.3 Historique

La modélisation par éléments finis de la section droite d'aimants quadripolaires a été entreprise au STCM depuis 1990 par M. Chapman [4]. De nombreuses améliorations ont été apportées depuis par P. Védrine (1990) [5], puis par P. Védrine et L. Grillet (1995) [6] et C. Forest Divonne (1996) [7] dans le cadre de la conception des aimants quadripolaires en NbTi pour le LHC. Voici les principales options et hypothèses prises en compte.

La géométrie est réduite à un huitième de la section droite. Elle est modélisée en 2D en contraintes planes. La prise en compte de l'influence de l'empilement à 90° des colliers est effectuée en modélisant deux couches de colliers (avant et arrière). Les conditions aux limites imposées aux colliers induit un mouvement de cisaillement des colliers, rendant compte de l'effet de l'empilement alterné.

Les différentes phases de calculs (frettage, refroidissement, mise sous courant) sont simulées indépendamment les unes des autres. Les résultats sont ajoutés pour obtenir l'état mécanique final.

Tous les composants de la bobine sont supposés parfaitement collés entre eux.

Les modules d'élasticité utilisés pour les simulations de fretage, de mise sous courant et de refroidissement sont, respectivement, les modules à température ambiante (300K), à température de fonctionnement (2K) et la moyenne des modules aux différentes températures. Des études en prenant en compte l'orthotropie de la bobine et la plasticité dans les colliers ont été aussi entreprises.

Les conducteurs sont modélisés individuellement et les efforts de Lorentz (calculés avec le logiciel ROXIE [11]) sont appliqués aux centres de gravité des conducteurs.

Le processus de fretage est modélisé en imposant une force sur l'encoche des colliers.

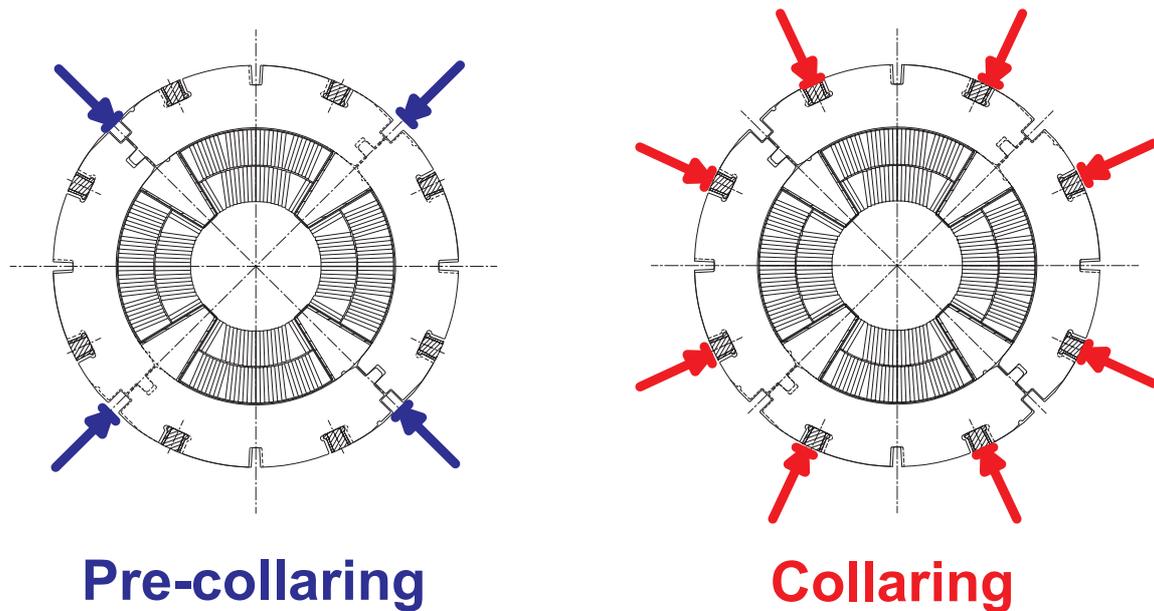
En 1998, une collaboration avec le LMT-Cachan a permis d'apporter des éléments supplémentaires dans le modèle. L. Champaney [8], à l'aide du logiciel COFAST, a étendu la modélisation en 3D, et a pris en compte des surfaces de frottement entre les colliers et la bobine, et entre le doigt et la bobine.

### III.4 Pourquoi une nouvelle modélisation

La volonté d'avoir un modèle numérique décrivant de manière aussi complète que possible le processus de fretage et les cycles de fonctionnement d'un aimant est l'objectif principal qui a débouché sur une remise à plan de la modélisation de la partie droite.

Le processus de fretage est décomposé en deux phases (cf. Figure 2):

- le pressage sur les longerons (Pre-collaring),
- la mise en place et l'insertion des clavettes (Collaring).



**Figure 2 : Processus de frettage des bobines**

Le mouvement des colliers engendré par le processus de frettage nécessite d'effectuer les calculs sur une géométrie réactualisée à chaque pas de temps. L'hypothèse des petites perturbations ou petites déformations n'est alors plus valide, et il est nécessaire d'effectuer les simulations en utilisant une méthode en grands déplacements.

La prise en compte de la réactualisation de la géométrie nécessite d'enchaîner directement les calculs. Une même procédure permet d'imposer des chargements mécaniques et thermiques dépendant du temps et représentant l'histoire des sollicitations subit par l'aimant lors de sa fabrication et de son fonctionnement.

Cette procédure permet, de plus, d'effectuer des calculs en modélisant plus finement le comportement mécanique des matériaux utilisés (plasticité, dépendance des propriétés en fonction de la température).

La conséquence de cette volonté d'obtenir une modélisation plus riche, est une augmentation sensible de la taille du problème. La géométrie passe de un huitième à un quart de la géométrie (cf. Figure 3 à Figure 5).

### III.5 Le modèle par éléments finis

Le modèle par éléments finis est constitué de 10 sous éléments possédant des caractéristiques mécaniques différentes.

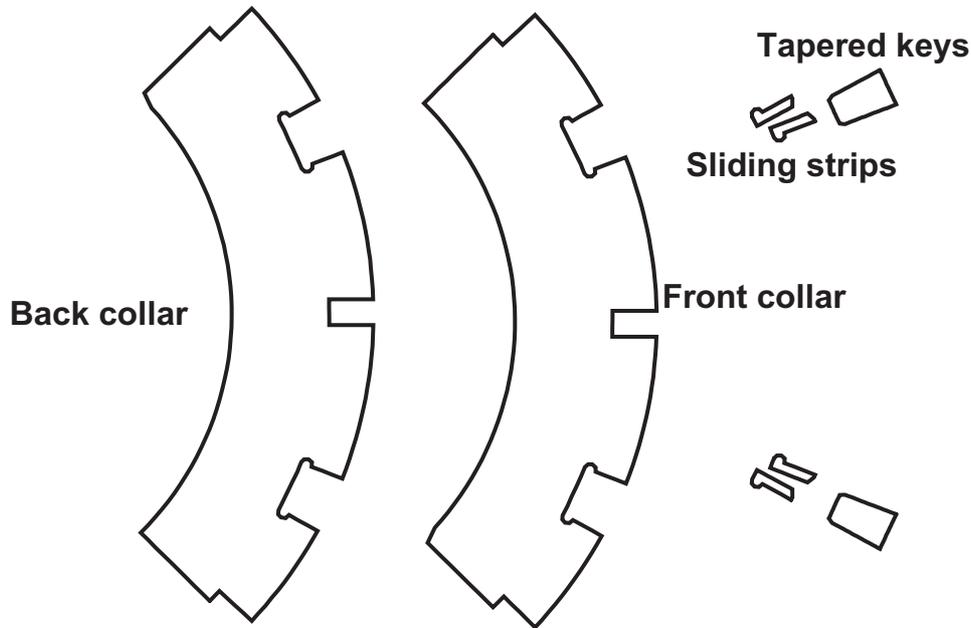
La bobine comporte 6 sous-éléments. Elle est constituée :

- des conducteurs en Nb<sub>3</sub>Sn isolés avec le ruban de fibres de Silice et imprégnés sous vide (4 blocs de conducteurs, chaque conducteur est défini),
- des cales angulaires,
- de l'isolation intercouche,
- de l'isolation de masse,
- de l'isolation interpôle,
- de la cale polaire (avec le système de guidage).

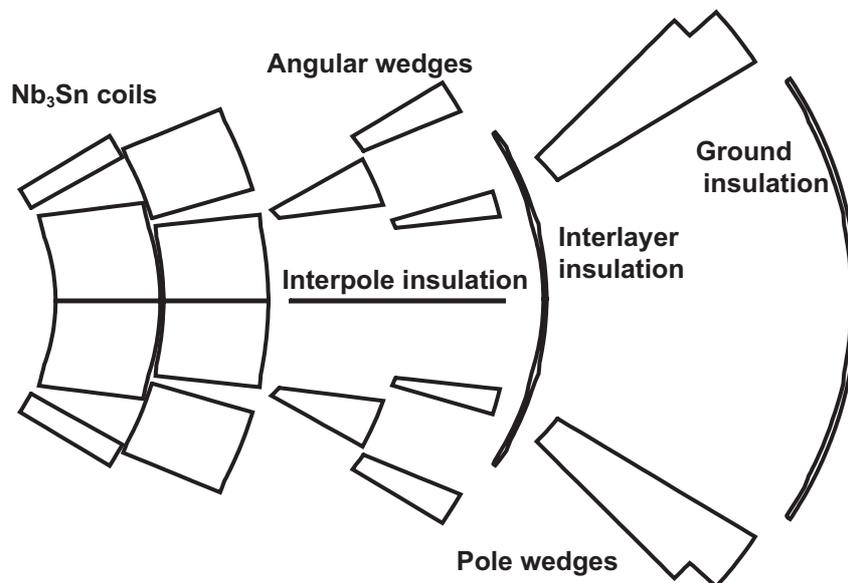
Deux demi pôles sont modélisés.

Ensuite, deux colliers (colliers avant et arrière) sont modélisés afin de rendre compte de l'effet de l'empilement alterné à 90 °, ainsi que les clavettes et lardons pour simuler le processus de frettage.

Sur les figures suivantes (cf. Figure 3 - Figure 4), les différents sous-éléments sont représentés.



**Figure 3 : Modèle géométrique : colliers, lardons et clavettes**



**Figure 4 : Modèle géométrique, la bobine et ses composants**

L'assemblage et la mise en position géométrique des sous-éléments sont représentés sur la figure suivante (cf. Figure 5).

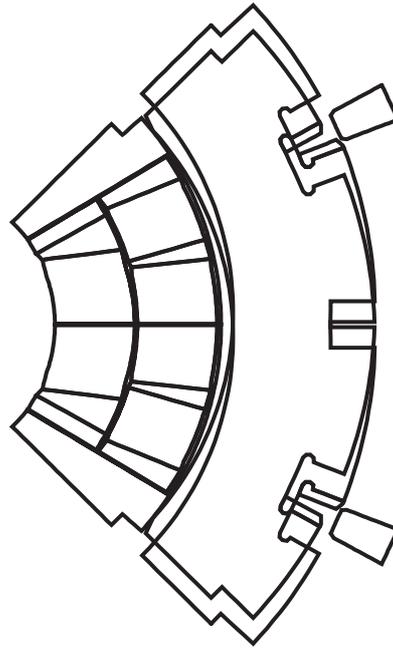


Figure 5 : Modèle géométrique : assemblage des sous-éléments

### III.6 Les conditions aux limites, surfaces de contact, hypothèses de calculs

La géométrie 3D est réduite à une modélisation en 2D, en contraintes ou déformations planes.

Les conditions aux limites imposées sont des conditions de symétrie en déplacements. Les plans (1) et (2) pour les bobines, et le plan (3) pour le collier avant, et le plan (4) pour le collier arrière (cf. Figure 6).

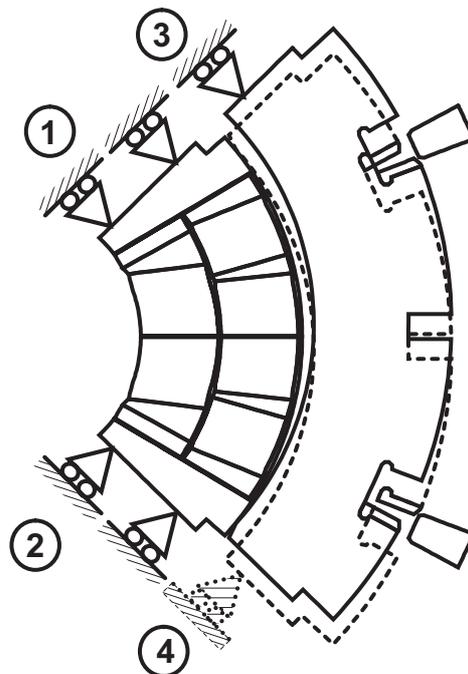
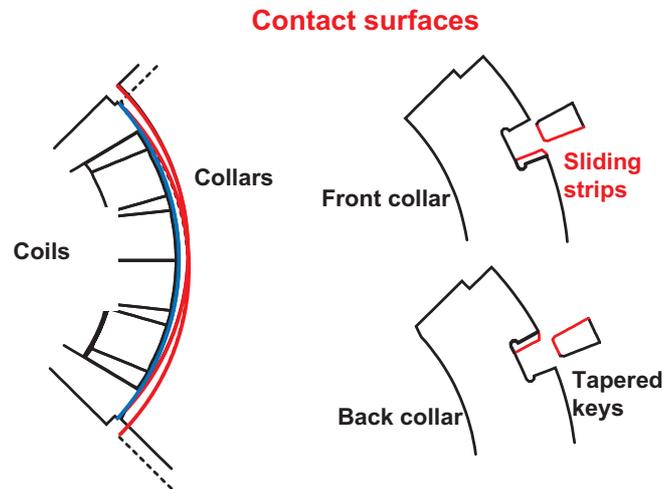


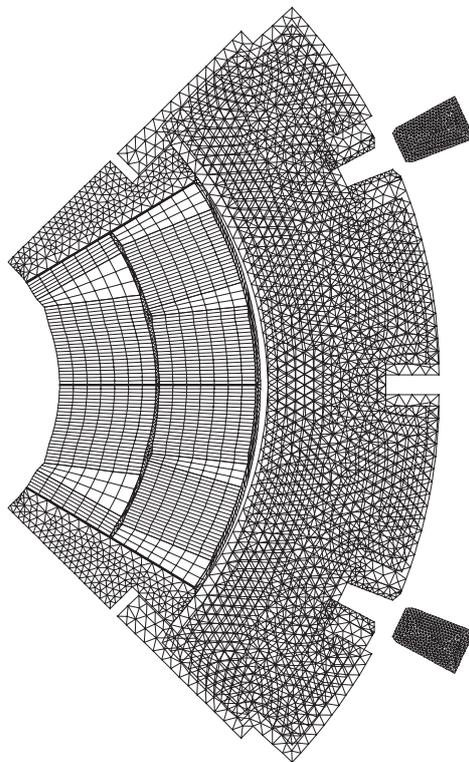
Figure 6 : Conditions aux limites en déplacement

Six interfaces de types contact sont modélisées. Le contact entre les bobines et les colliers (deux colliers avant et arrière), et le contact entre les clavettes et les lardons (quatre lardons). Dans un premier temps, l'hypothèse de contact parfaitement glissant est adoptée, dans le but d'alléger le temps de calcul. Sur les figures suivantes sont représentées les interfaces de contact entre les bobines et les colliers et entre les clavettes et les lardons (cf. Figure 7) .



**Figure 7 : Surfaces de contact entre les bobines et les colliers et entre les clavettes et les lardons**

Le maillage est obtenu avec des éléments de type P1 (degrés d'interpolation de premier ordre). Les éléments sont des triangles à 3 nœuds et des quadrilatères à 4 nœuds. Le maillage contient 6023 nœuds, il est composé de 8796 éléments. Sur la figure suivante (cf. Figure 8), le maillage initial est représenté.



**Figure 8 : Maillage initial d'un quart du quadripôle**

### III.7 Les propriétés des matériaux

Les propriétés de matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau suivant :

Materiau <i>Sous éléments</i>	Temp . K	Contrainte à rupture MPa	Module d'élasticité GPa	Limite élastique MPa	Coefficient de retrait thermique intégré
Acier 13Rm19	300	846	210	475	
<i>Colliers</i>	4.2	1620	210	1088	$-2.9 \cdot 10^{-3}$
Acier (316L)	300	596	210	275	
<i>Clavettes &amp; Lardons</i>	4	1570	210	666	$-2.9 \cdot 10^{-3}$
Alliage d'Aluminium Bronze	300		110		
<i>Cales angulaires &amp; polaires</i>	4.2		110		$-3.6 \cdot 10^{-3}$
Isolation Kapton	300		4		
<i>Isolation de Masse et interpôle</i>	4.2		4		$-6.0 \cdot 10^{-3}$
Nb <sub>3</sub> Sn + isolation + résine	300		30		
<i>Bobinage</i>	4.2		42		$-3.9 \cdot 10^{-3}$

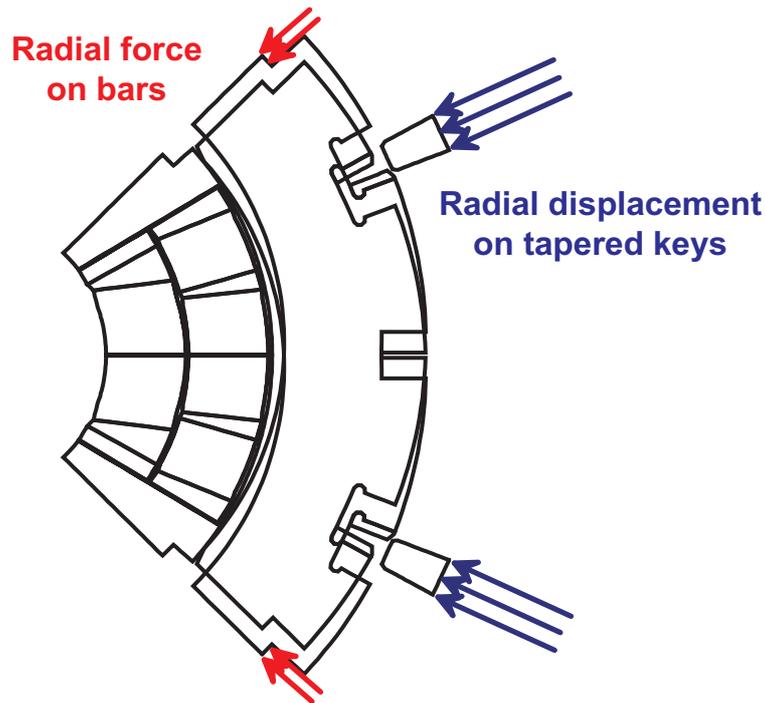
Le comportement mécanique des bobines en Nb<sub>3</sub>Sn est fortement non-linéaire et possède une légère hystérésis. Des caractérisations expérimentales obtenues au laboratoire de mécanique du STCM avec des empilements de conducteurs droits mettent en évidence un mécanisme non-linéaire reproductible [9][10]. Celui-ci intervient lorsque l'échantillon est vierge de toute sollicitation mécanique. Cependant, après cyclage, le comportement mécanique de la bobine en Nb<sub>3</sub>Sn peut être approché par une régression linéaire. Les rapports [12-13] détaillés numéro 5-2650N—2300 004 00 et 5-2650N—2300 005 00 illustrent ce comportement mécanique. Tous les matériaux sont supposés avec un comportement mécanique isotrope. Des études [7] ont montré une faible influence de la prise en compte de l'orthotropie des matériaux.

### III.8 Le chargement mécanique

Le chargement mécanique est divisé en quatre principales phases successives :

- Fretage via les longerons,
- Fretage via les clavettes,
- Mise en froid (de 300K à 4K),
- Mise sous courant (efforts de Lorentz) à température cryogénique.

Pour simuler le fretage via les longerons, on applique un effort sur les encoches polaires des colliers (cf. Figure 9 ). Le fretage via les clavettes est simulé en imposant un déplacement radial des clavettes (cf. Figure 9 ).



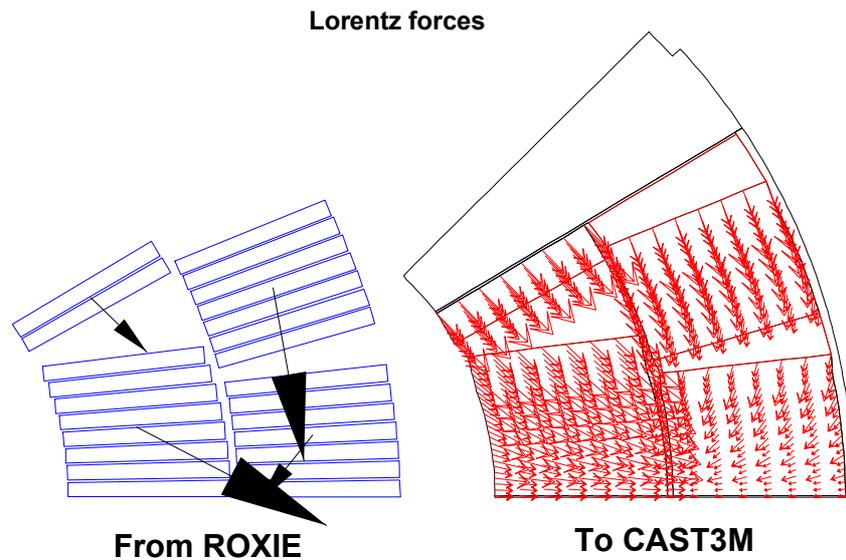
**Figure 9 : Chargement mécanique : processus de frettage**

La mise en froid est modélisée en imposant une diminution de température de manière homogène sur toute la géométrie. On suppose que la mise en froid est suffisamment lente et contrôlée.

La mise sous courant est modélisée en imposant des efforts de Lorentz calculés avec le logiciel ROXIE. Les efforts de Lorentz sont déterminés aux centres de gravité des conducteurs avec un courant d'excitation de 11870 A. La résultante sur un octant des efforts de Lorentz est de :

- $F_x = 400,775 \text{ kN/m}$ ,
- $F_y = -711,953 \text{ kN/m}$

Cette méthode induit une précision moindre des composantes des efforts lors du calcul mécanique. Le logiciel ROXIE fournit les valeurs des efforts de Lorentz aux centres de gravité de chaque conducteur. Afin, d'appliquer correctement ces efforts volumiques, il est nécessaire d'extrapoler ces valeurs en chaque points du maillage utilisé. Du fait de cette procédure, les efforts de Lorentz sont constants par conducteur, ce qui n'est pas le cas réel. Un calcul couplé électro-mécanique permettrait de résoudre cette approximation des efforts de Lorentz. La figure suivante (cf. Figure 10) montre, sous forme vectorielle, le profil des efforts de Lorentz.

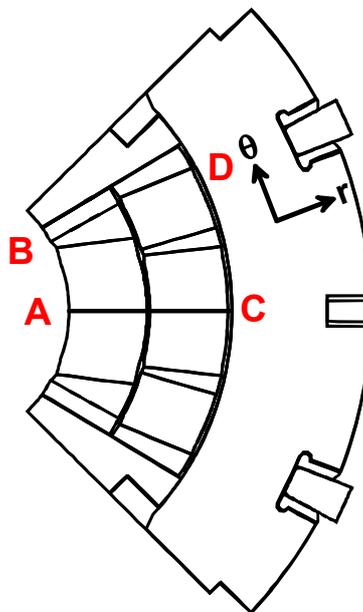


**Figure 10 : Chargement mécanique ; efforts de Lorentz**

### III.9 Les résultats des simulations par éléments finis

Afin de valider la conception de la partie droite de l'aimant quadripolaire, de nombreuses simulations ont été effectuées. Celles-ci ont permis la détermination de :

- La valeur de la précontrainte optimale ( $0 < \sigma_{\text{coil}} < 150\text{MPa}$ ),
- L'influence des tolérances de fabrication sur la valeur de la précontrainte,
- L'influence du système de guidage (valeur de l'ajustement) des cales polaires.



**Figure 11 : Géométrie finale et localisation de points particuliers**

### III.9.1 Etude de l'état mécanique optimisé

#### III.9.1.1 Le frettage

##### *Pré-frettage via les longerons*

La première étape du frettage consiste à appliquer un effort via les longerons sur les colliers. L'effort est de l'ordre de quelques tonnes et est appliqué au niveau du plan de symétrie des colliers.

Lors de cette étape, la contrainte est relativement faible. Les mécanismes engendrés sont principalement d'ordre géométriques. Durant le pré-frettage, tous les constituants de l'aimant se mettent en place et s'équilibrent.

##### *Frettage via les clavettes*

La seconde étape consiste à introduire les clavettes dans leurs encoches. Pour cela, on impose un déplacement radial des clavettes. De cette manière, on peut déduire l'effort résultant nécessaire pour fretter l'aimant (effort de 891 N/mm). Les vérins de la presse de frettage ont une capacité de 170000N, soit pour fretter 100 mm : 1700 N. En prenant en compte les frottements, le frettage de la bobine reste possible avec l'outillage existant. Durant cette phase, on constate une forte augmentation de la précontrainte avec une faible déformation de la bobine et des colliers. La contrainte maximale se situe au point A et elle est de -142 MPa. La contrainte moyenne dans les conducteurs est de -87 MPa avec un minimum au point C (-47 MPa). La contrainte radiale reste faible. Les déformations sont de l'ordre de 12 µm suivant la direction azimutale et de 85 µm suivant la direction radiale.

La contrainte équivalente de Von Mises dans les colliers est de 736 MPa. Une petite zone plastique est présente au niveau des encoches de clavettes.

#### III.9.1.2 La mise en froid

Durant le refroidissement de l'aimant, les retraits thermiques différentiels des matériaux font évoluer la contrainte dans le bobinage. On observe une perte de précontrainte azimutale moyenne de l'ordre de 19 MPa. Le point le plus chargé reste le point A avec -119 MPa et le moins chargé, le point C avec -34 MPa. La contrainte moyenne dans les conducteurs est de -66 MPa. La contrainte radiale reste faible. Les déformations sont de l'ordre de 9 µm suivant la direction azimutale. Par contre, suivant la direction radiale, on obtient une valeur importante qui correspond au retrait globale de la structure et elles sont de 0.26 mm suivant la direction radiale.

#### III.9.1.3 La mise sous courant

Durant la phase de montée en courant, les efforts de Lorentz augmentent. La distribution de la contrainte azimutale change. Au courant nominal (11870A), le point le plus chargé est le point A avec -134 MPa, mais le point le moins chargé devient le point B avec -13 MPa. La contrainte moyenne dans les conducteurs est de -67 MPa. La contrainte radiale reste faible. Les déformations sont de l'ordre de 10 µm suivant la direction azimutale. Le bobinage reste toujours sous une contrainte de compression.

Par contre, la contrainte équivalente de Von Mises est très élevée (1396 MPa) mais elle reste inférieure à la contrainte limite (il est à noter la surestimation de la contrainte de Von Mises du fait du calcul avec des matériaux purement élastiques). La zone plastique située au pied de l'encoche des clavettes s'étend, mais reste cependant acceptable. On remarquera, aussi, le rôle joué par les lardons qui 'absorbe' la contrainte surélevée.

### III.9.2 Résumé

Les principaux résultats sont rassemblés dans le Tableau 2.

	Units	Collaring with bars	Collaring with keys	Cool down	Energization				
<b>Conditions</b>									
Temperature	K	300	300	4.2	4.2				
Current	A	0	0	0	11870				
Load on bars	N/mm	280							
Load on keys	N/mm		<b>891</b>						
<b>Coils</b>									
Stress		$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$
Point A	MPa	<b>-52</b>	-9	<b>-142</b>	-31	<b>-119</b>	-25	<b>-134</b>	-31
Point B	MPa	-2	0	-87	-2	-52	-3	<b>-13</b>	0
Point C	MPa	-2	0	-47	-19	-34	-7	-41	-10
Point D	MPa	-29	-7	-111	-58	-82	-28	-75	-25
Average over first layer	MPa	-27	-4	-102	-20	-78	-10	-77	-16
Average over second layer	MPa	-16	-2	-76	-34	-57	-20	-60	-25
Average over coil	MPa	-21	-3	-87	-28	-66	-16	-67	-21
Displacement		$\Delta_{\theta}$	$\Delta_r$	$\Delta_{\theta}$	$\Delta_r$	$\Delta_{\theta}$	$\Delta_r$	$\Delta_{\theta}$	$\Delta_r$
Average over midplane	mm		-0.009		-0.06		-0.248		-0.243
Average over pole plane	mm	-0.004	-0.026	-0.012	-0.085	-0.009	-0.267	-0.010	-0.266
<b>Collars</b>									
Peak Von Mises Stress	MPa			736				<b>1396</b>	

**Tableau 2 : Principaux résultats issus de l'étude numérique**

### III.9.3 Influence des tolérances de fabrication

Une étude portant sur l'influence des tolérances de fabrication a été entreprise. De nombreux calculs ont été effectués en faisant varier le rayon extérieur des bobines tout en conservant le même rayon intérieur des colliers. Ces simulations montrent une relation linéaire entre l'écart sur le rayon extérieur de la bobine et la contrainte moyenne.

Une variation de +0.05 mm sur le rayon engendre une augmentation de la contrainte de 55 MPa. De même, une diminution de -0.05 mm sur le rayon engendre une variation de la contrainte de -55 MPa.

**Si on tolère une variation de  $\pm 20$  MPa, la tolérance de fabrication devra être comprise entre  $\pm 0.02$  mm (tolérances portant sur les rayons des bobines et des colliers).**

### III.9.4 Influence de l'ajustement du système de guidage des colliers

Le positionnement des colliers par rapport aux bobines est assuré par un doigt dont les valeurs de l'ajustement ont été étudiées de manière à améliorer la distribution de la contrainte azimutale dans la bobine. Les valeurs limites sont déterminées par la force nécessaire pour fretter les bobines et par la zone plastique dans la cale pôle. L'intervalle d'étude est ainsi limité à un ajustement de type 10 H7m6 ou libre, ce qui correspond à un écart de  $\pm 0.01$  mm sur la taille du doigt. Dans le tableau suivant on observe l'amélioration de la distribution de la contrainte azimutale ( $\Delta\sigma$ ) en fonction de l'ajustement.

	$\sigma_{MAX}$	$\sigma_{min}$	$\Delta\sigma$	$\sigma_{moy}$
-10 $\mu\text{m}$	-149	-40	109	-84.8
-5 $\mu\text{m}$	-147	-42	105	-85.8
0 $\mu\text{m}$	-145	-45	100	-86
+5 $\mu\text{m}$ (1)	-142	-47	95	-87
+10 $\mu\text{m}$ (2)	-139	-50	89	-88.6

**Tableau 3 : Influence de la valeur de l'ajustement du doigt de guidage sur la distribution de la contrainte**

En conclusion, on adoptera un ajustement dur afin d'améliorer la distribution de la contrainte azimutale dans la bobine. **La valeur préconisée est : 10H7k6(cas n°1, 5 $\mu\text{m}$ ) ou 10H7m6 (cas n°2, 10 $\mu\text{m}$ ).**

#### **IV Conclusions et perspectives**

La valeur de la précontrainte moyenne déterminée analytiquement est en excellente corrélation avec la valeur déterminée par le modèle numérique. Cette corrélation permet aussi de valider le nouveau modèle numérique.

Le nouveau modèle numérique a permis de valider certains points de la conception de la partie droite de l'aimant quadripolaire en Nb<sub>3</sub>Sn, tels que :

- l'utilisation d'une cale polaire insérée dans le bobinage de manière permanente,
- le principe de positionnement des colliers par rapport aux bobines ainsi que les jeux de fonctionnement (valeur de l'ajustement préconisé : 10H7k6 ou 10H7m6),
- validation du système de frettage en :
  - Assurant une distribution acceptable de la contrainte dans le bobinage ( $15 < \sigma_{MAX} < 140$  MPa)
  - Limitation durant tout le fonctionnement et le processus de fabrication de la contrainte azimutale inférieure à 150 MPa
  - Permettant le frettage de l'ensemble avec les outillages disponibles au STCM (efforts sur les clavettes de 891 N/mm),
  - Limitation de la plasticité dans les composants (colliers),
- Déterminer, par l'étude des déplacements, les dimensions de fabrication des bobines ainsi que les tolérances admissibles.

Un essai de frettage sur une maquette d'une longueur de 200 mm va être entreprise afin de valider le nouveau modèle numérique mis en œuvre.

Des études restent à entreprendre afin d'appréhender les discontinuités d'un point de vue mécanique entre la partie droite et les têtes de bobines ou les matériaux ont des propriétés différentes (matériaux céramiques et matériaux métalliques).

Une étude de la plasticité dans les colliers va être achevée.

Enfin, un point important consiste à une entreprendre une caractérisation et une modélisation plus fines du comportement thermomécanique du câble supraconducteur. Des actions de R&D sont en cours de lancement afin de comprendre les différents mécanismes [9] [10].

## V Références

- [1] CASTEM2000, trademark from CEA/Saclay, France
- [2] M. Peyrot, et al., "Construction of the new prototype of main quadrupole cold mass for the arc short straight sections of LHC," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 10 No. 1, pp. 170-173, 2000.
- [3] C. Gourdin, A. Devred, M. Durante, "*Présentation de la gamme de montage du quadripôle Nb<sub>3</sub>Sn*", rapport interne n°5-2650N—1500 004 99, CEA/Saclay – STCM, 1999.
- [4] M. Chapman, "*Analyse mécanique des quadripôles LHC #9*", Internal report 102 02A 000 TC 38, CEA/Saclay - STCM
- [5] P. Védrine, "*Pré-étude mécanique du nouveau quadripôles LHC*", Internal report 5C2390T-00920 001 96, CEA/Saclay – STCM, 1996.
- [6] L. Grillet, "*Calcul mécanique des quadripôles du LHC* ", Rapport de Stage de Maîtrise ENS-Cachan, Option Génie Mécanique, Sept. 1995.
- [7] C. Forest Divonne, "*Calcul mécanique des quadripôles du LHC* ", Rapport de Stage de Maîtrise ENS6 Cachan, Option Génie Mécanique, Sept. 1996
- [8] L. Champaney, "*Etude de l'influence de phénomènes de frottement dans le calcul mécanique en élasticité linéaire par éléments finis d'une section de quadripôle LHC*", LMT-Cachan, France, 1998.
- [9] C. Gourdin, M. Reytier, P. Védrine, "*Caractérisation et modélisation multi-échelles du comportement thermomécanique d'un câble composite supraconducteur*", 12<sup>ième</sup> Journées Nationales sur les Composites, Cachan, France, Nov. 2000.
- [10] M. Reytier, P. Bredy, A. Devred, M. Durante, C. Gourdin, P. Vedrine, "*Characterization of the Thermal and Mechanical Behaviors of Insulated Cables Stacks Representative of Accelerator Magnet Coil Assemblies*", Applied Superconductivity Conference, Virginia Beach, USA, Sept. 2000.
- [11] S. Russenschuck, F. Calmon et al. , "*Integrated design of superconducting accelerator magnets. A case study of the main quadrupole*", The European Physical Journal, Applied Physics, 1998.
- [12] M. Durante, " *Essais de compression sur empilements droits et autres échantillons* ", Rapport technique interne n°5-2650N—2300 004 00, 2000.
- [13] M. Durante, " *Mesure de retraits thermique d'empilements droits et d'autres échantillons* ", Rapport technique interne n°5-2650N—2300 005 00, 2000" ", 2000.

## VI Annexes

### Liste des figures

Figure 12 : Déformée initiale et cumulées de l'ensemble fretté .....	20
Figure 13 : Déformation lors du pré-fretage et du fretage.....	21
Figure 14 : Déformation lors du refroidissement et de la mise sous courant .....	22
Figure 15 : Contrainte azimutale dans la bobine lors du processus de fretage.....	23
Figure 16 : Contrainte dans la bobine lors du refroidissement et de la mise sous courant.....	24
Figure 17 : Contrainte radiale dans la bobine lors du processus de fretage .....	25
Figure 18 : Contrainte radiale dans la bobine lors du refroidissement et de la mise sous courant .....	26
Figure 19 : Contrainte de Von Mises dans les colliers à la fin du processus de fretage .....	27
Figure 20 : Contrainte de Von Mises dans les colliers après le refroidissement.....	28
Figure 21 : Contrainte de Von Mises dans les colliers après la mise sous courant (I=11870 A) .....	29
Figure 22 : Déplacement azimutal dans la bobine (pré-fretage et fretage) .....	30
Figure 23 : Déplacement azimutal dans la bobine (refroidissement et mise sous courant).....	31
Figure 24 : Déplacement radial dans la bobine (pré-fretage et fretage).....	32
Figure 25 : Déplacement radial dans la bobine (refroidissement et mise sous courant) .....	33
Figure 26 : Evolution de la contrainte azimutale le long du plan médian .....	34
Figure 27 : Evolution de la contrainte azimutale le long du plan polaire.....	35
Figure 28 : Evolution du déplacement azimutal le long du plan polaire .....	36
Figure 29 : Evolution du déplacement radial le long du plan polaire.....	37
Figure 30 : Evolution du déplacement radial le long du plan médian .....	38
Figure 31 : Evolution du déplacement du uniquement aux efforts de Lorentz .....	39

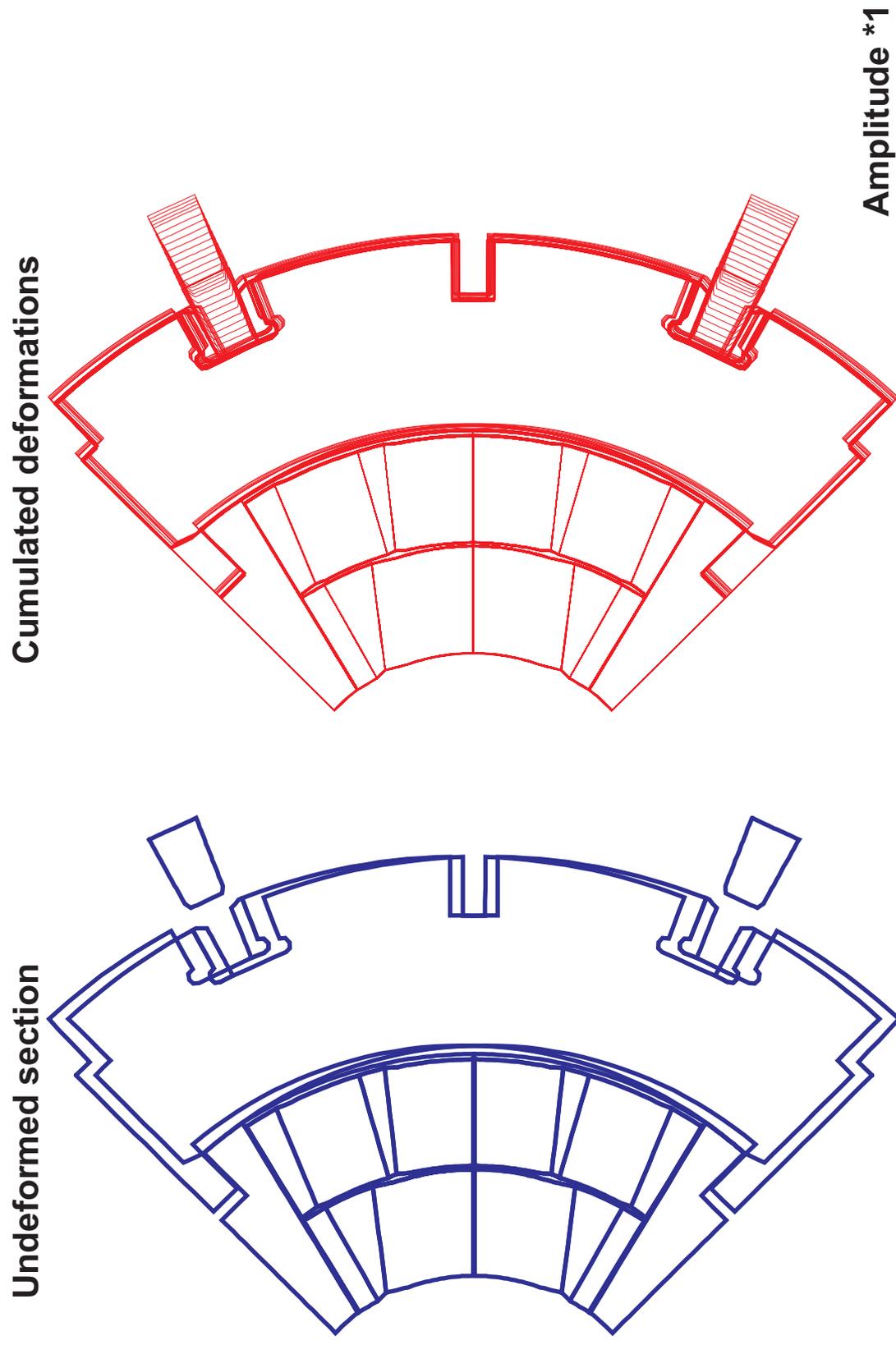


Figure 12 : Déformée initiale et cumulée de l'ensemble fretté

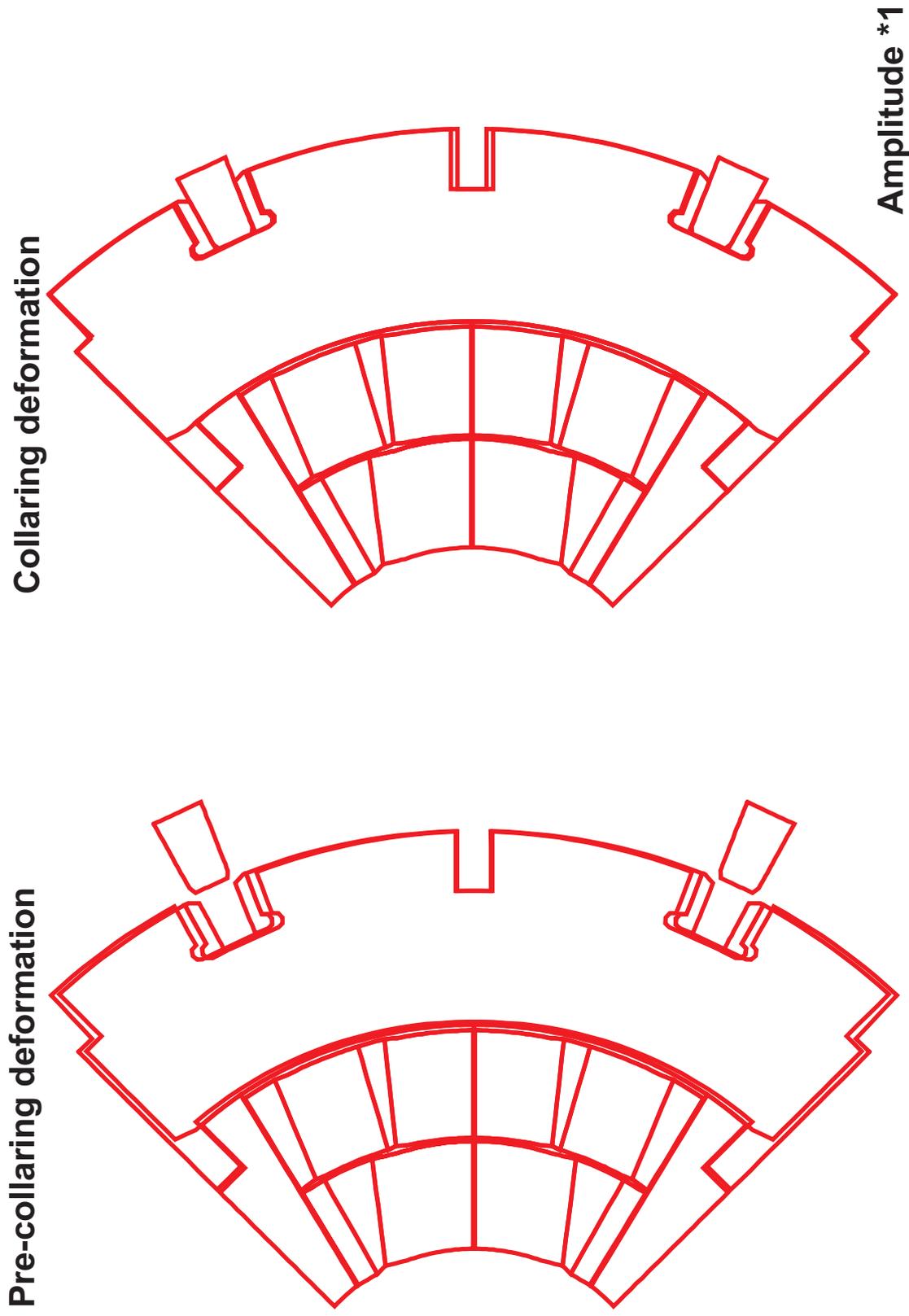


Figure 13 : Déformation lors du pré-fretage et du fretage

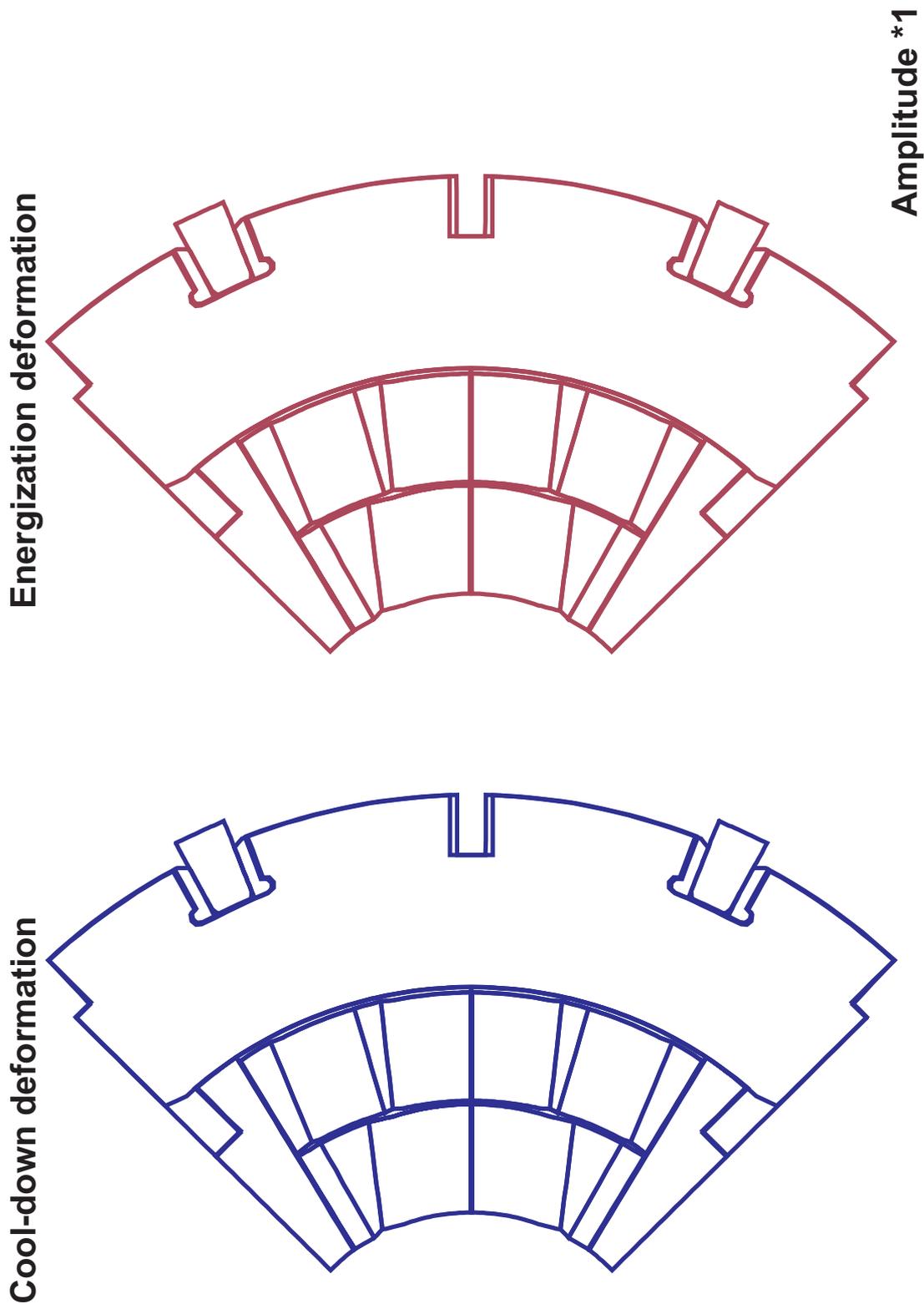


Figure 14 : Déformation lors du refroidissement et de la mise sous courant

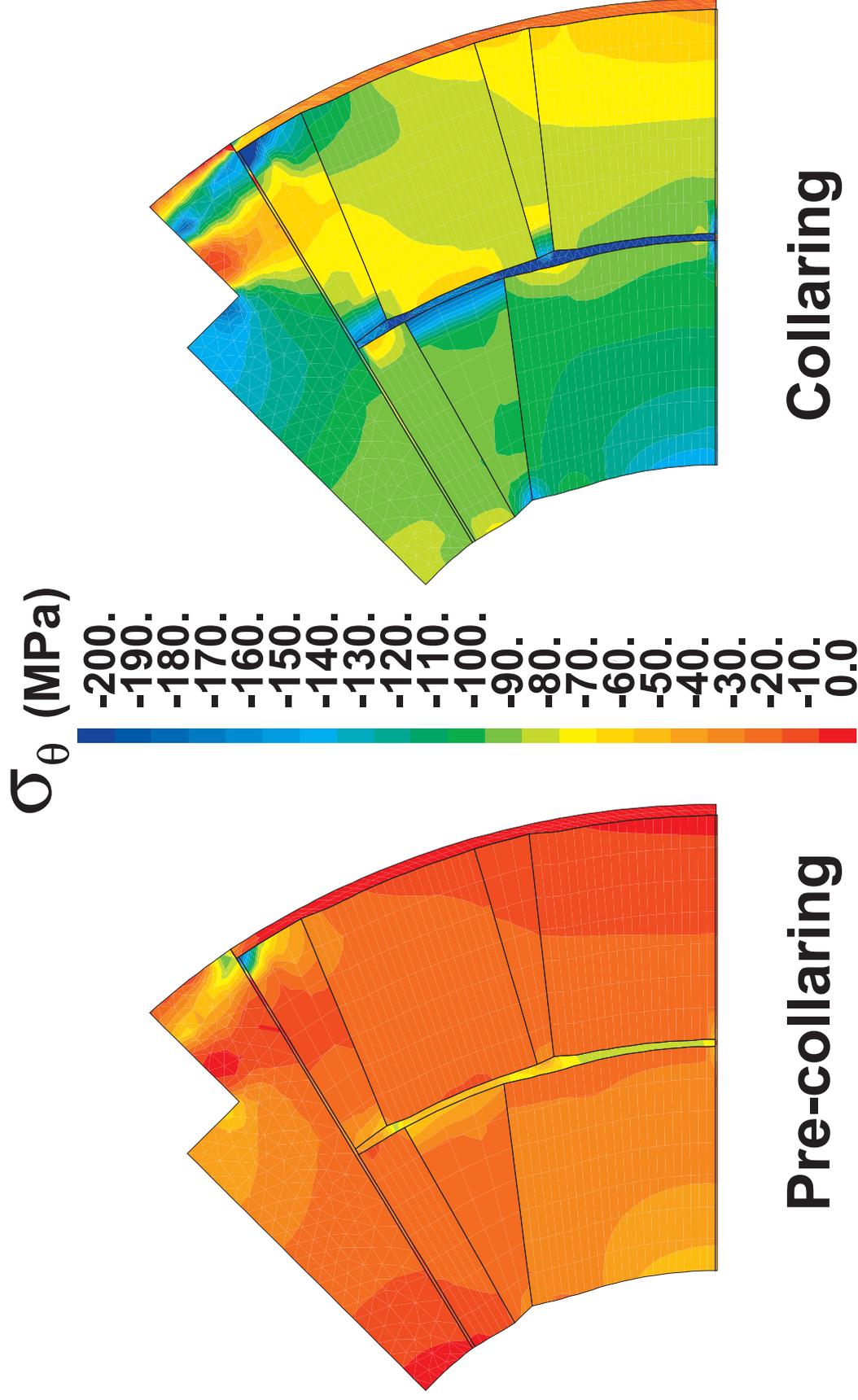


Figure 15 : Contrainte azimutale dans la bobine lors du processus de frettage

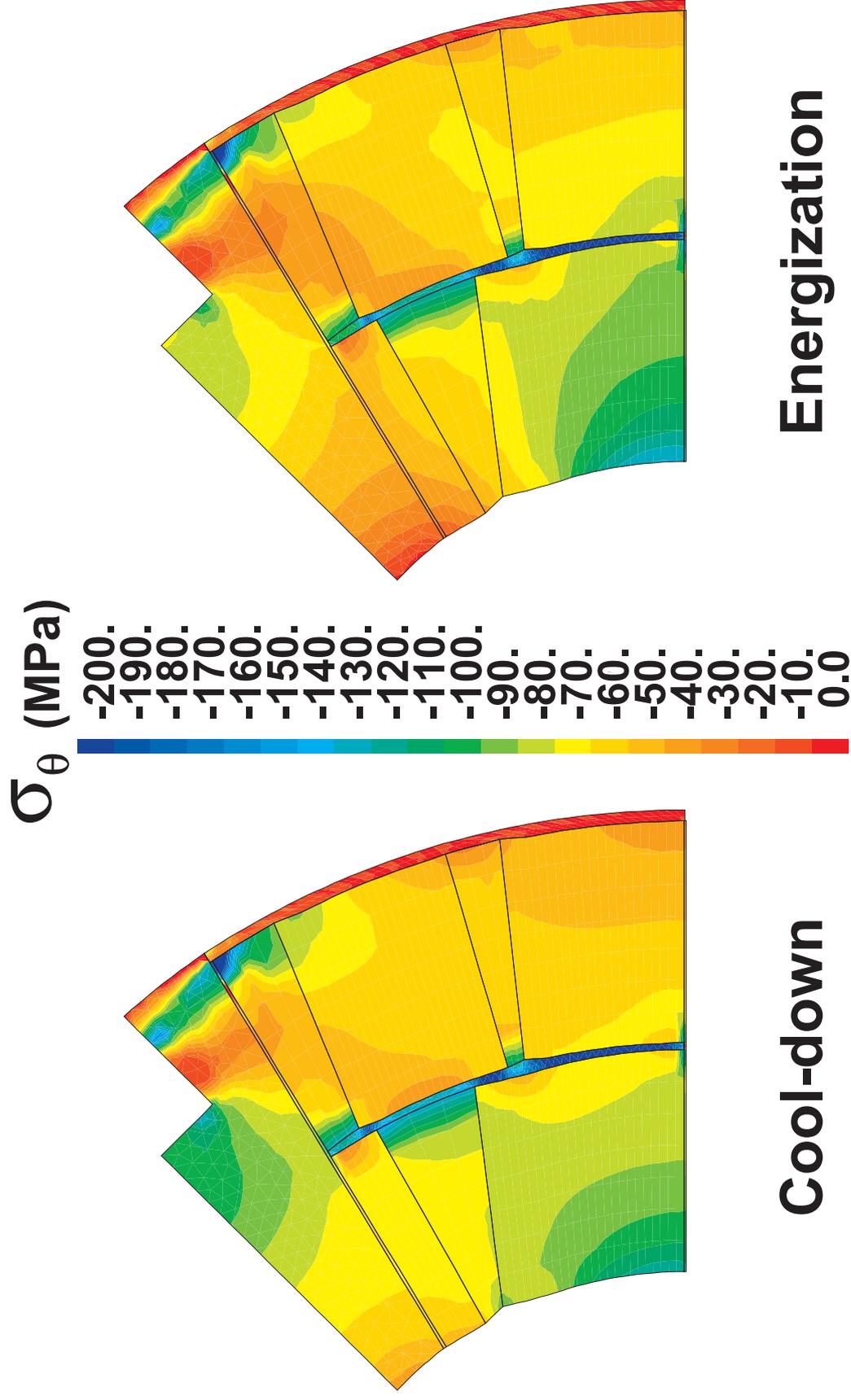


Figure 16 : Contrainte dans la bobine lors du refroidissement et de la mise sous courant

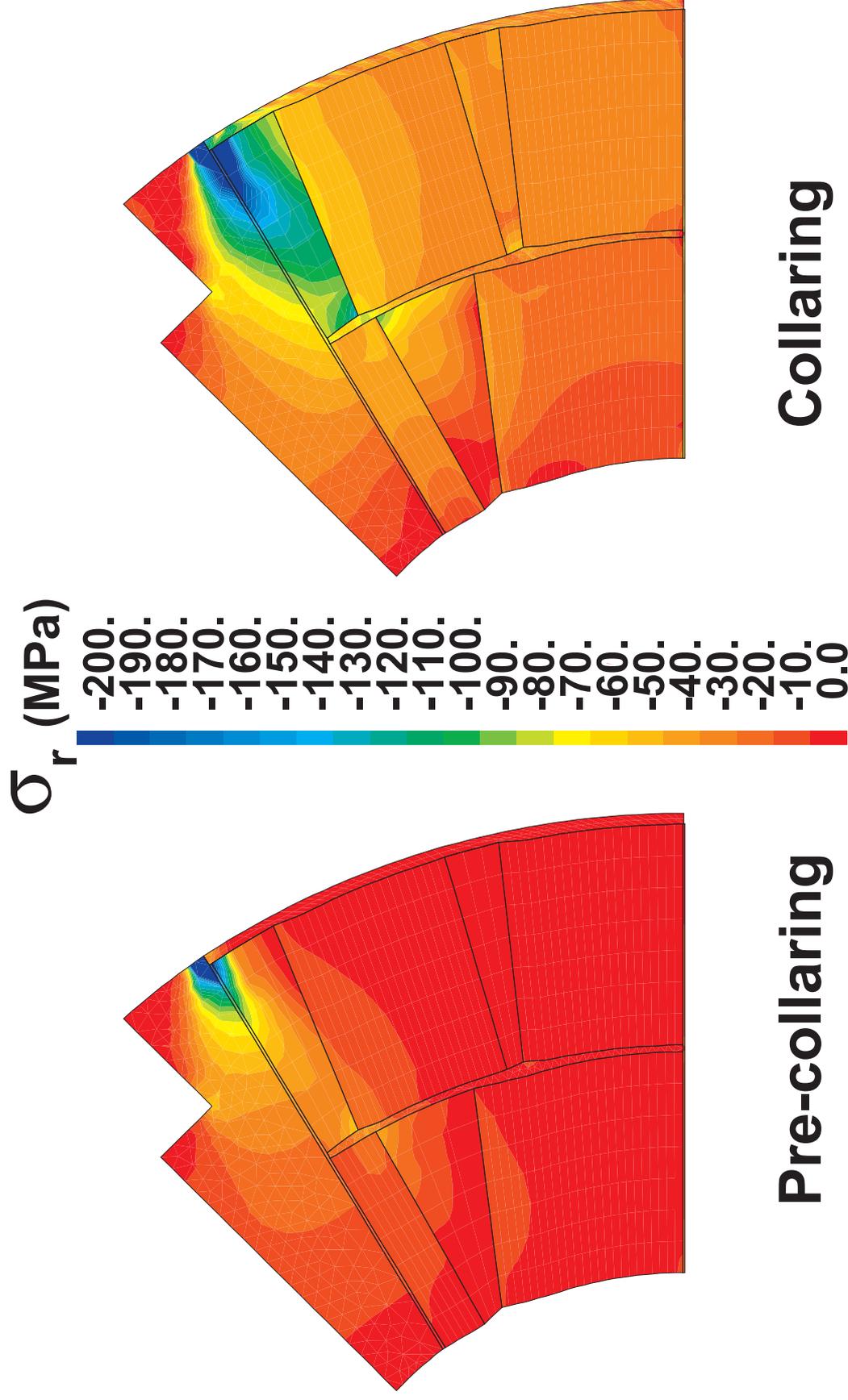


Figure 17 : Contrainte radiale dans la bobine lors du processus de frettage

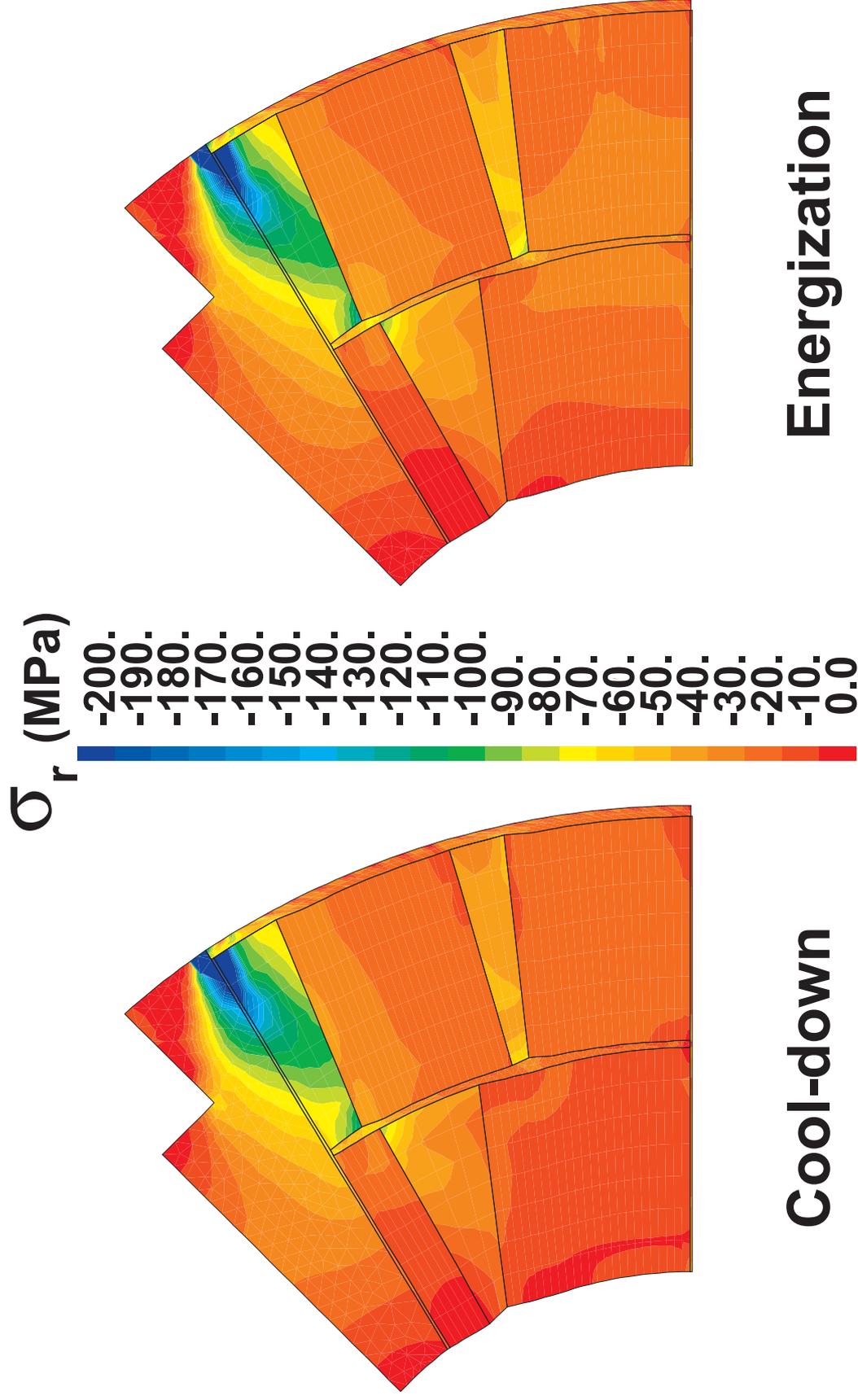


Figure 18 : Contrainte radiale dans la bobine lors du refroidissement et de la mise sous courant

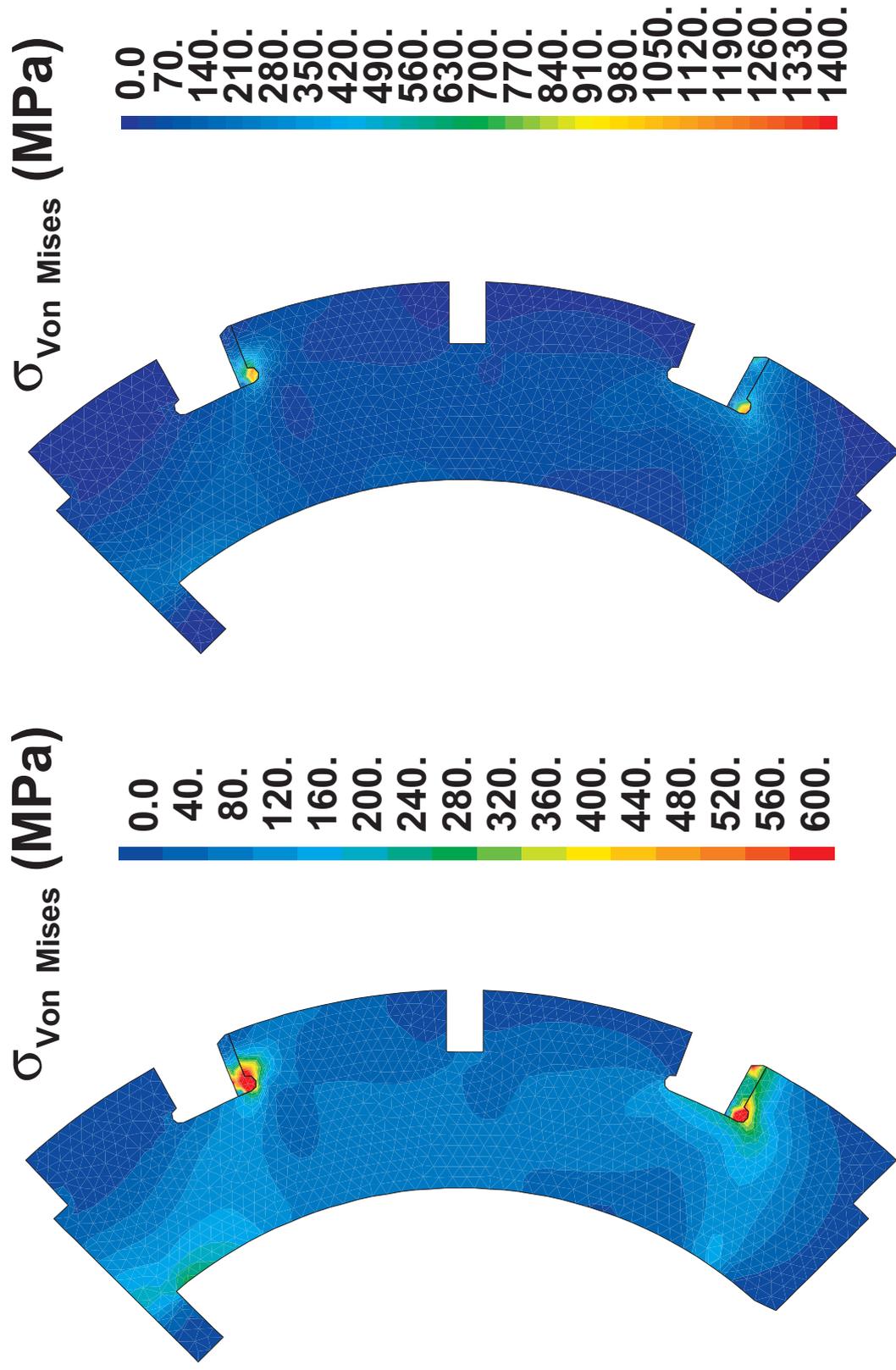


Figure 19 : Contrainte de Von Mises dans les colliers à la fin du processus de fretage

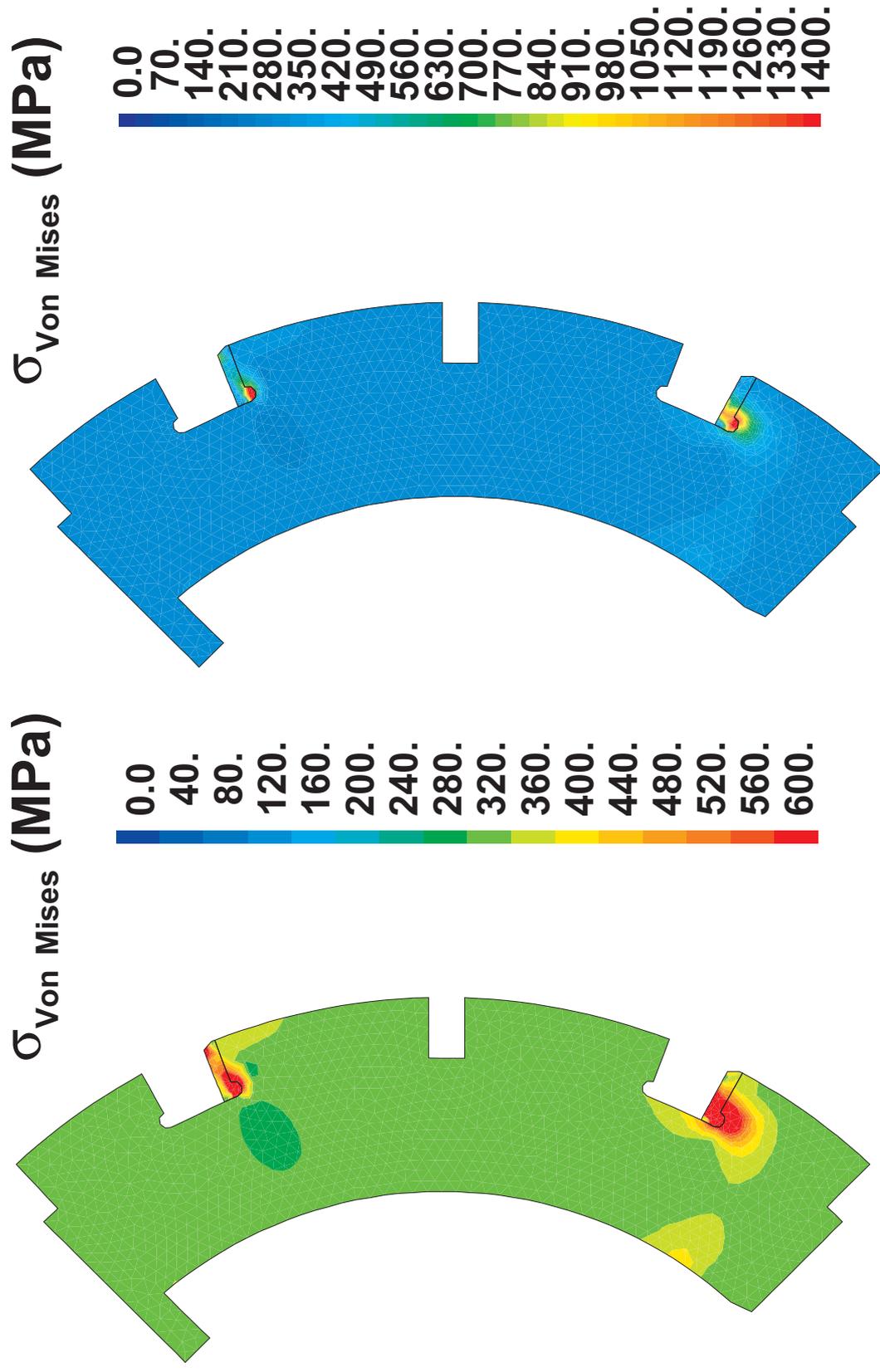


Figure 20 : Contrainte de Von Mises dans les colliers après le refroidissement

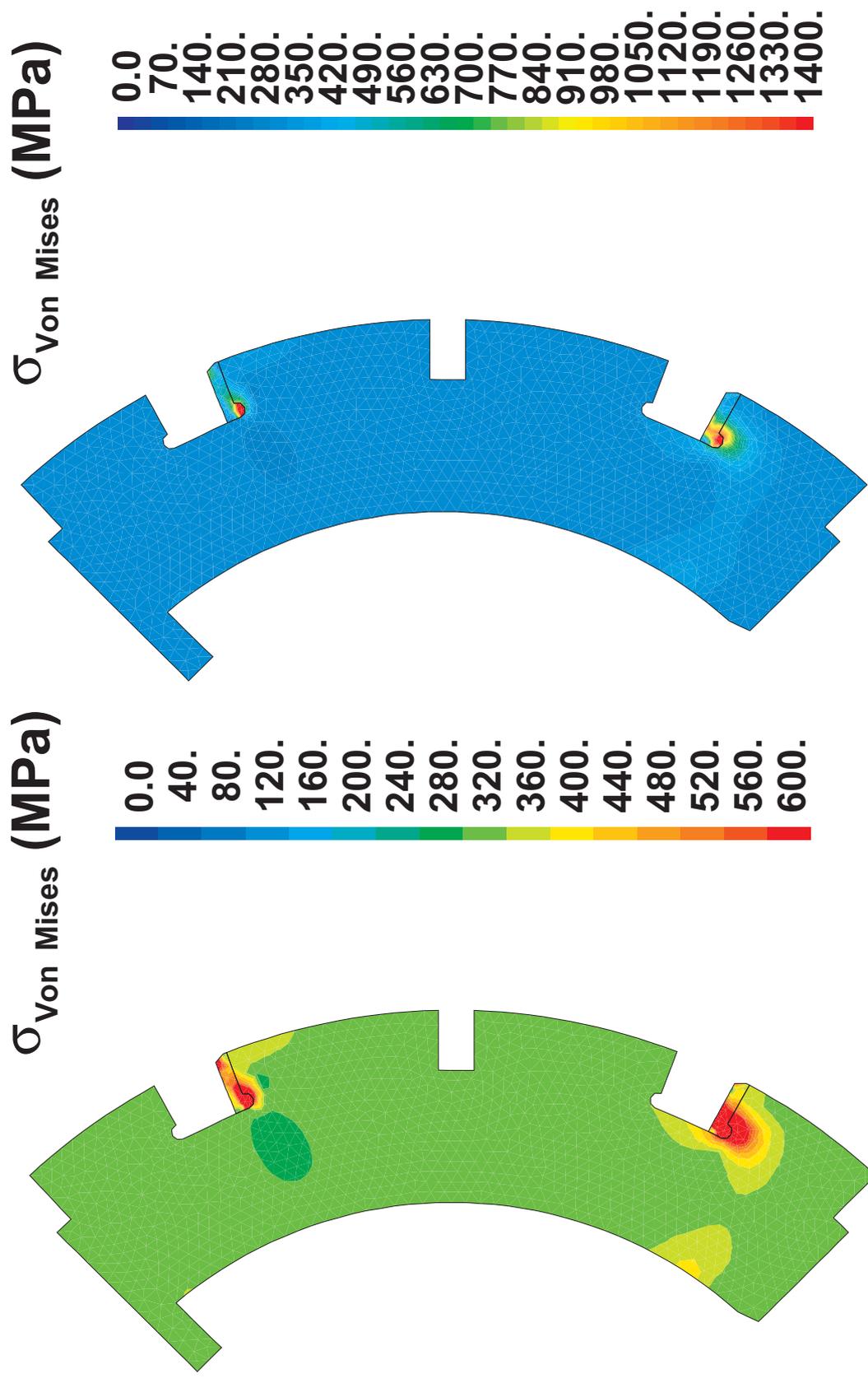


Figure 21 : Contrainte de Von Mises dans les colliers après la mise sous courant (I=11870 A)

## Azimuthal deflection

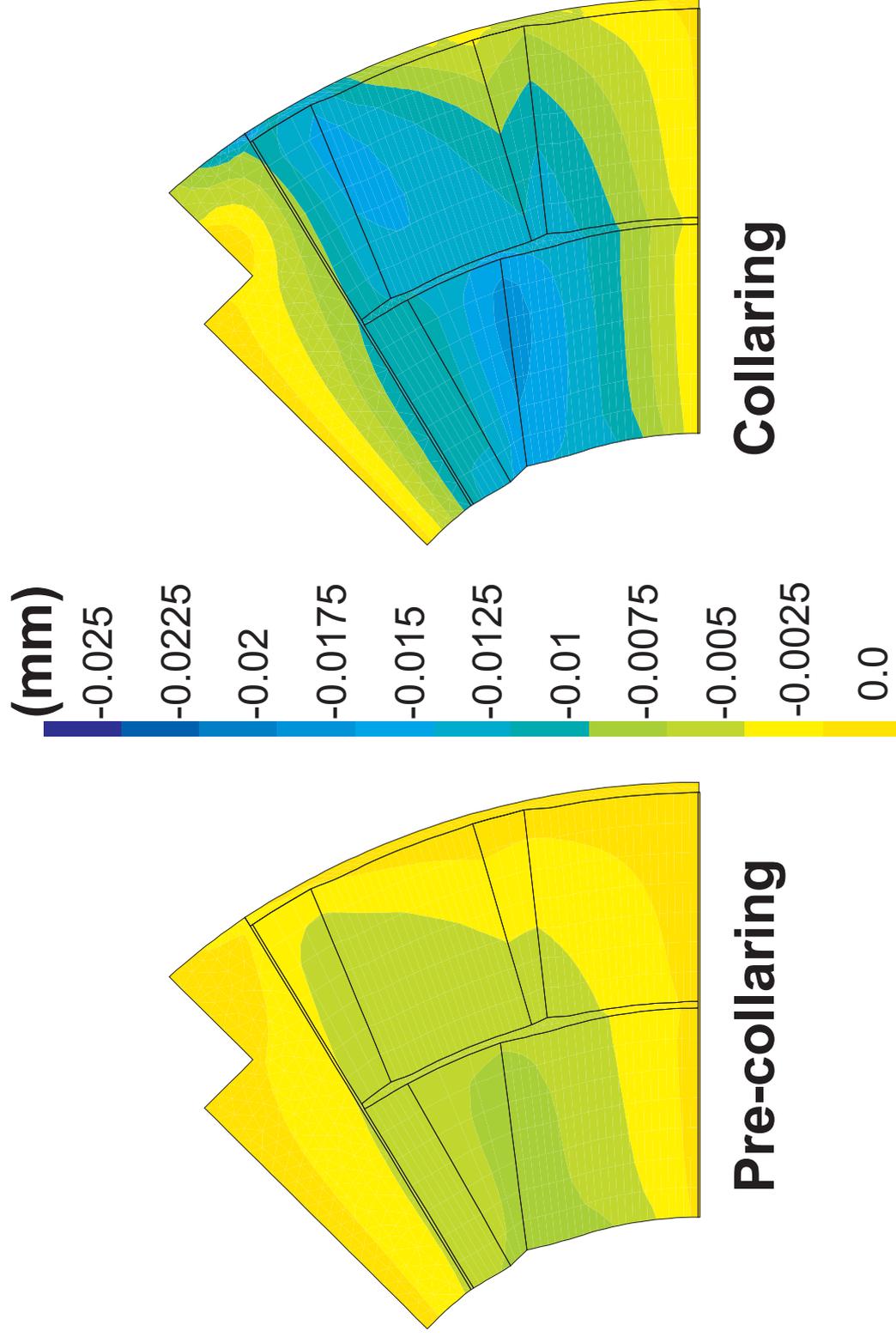


Figure 22 : Déplacement azimuthal dans la bobine (pré-fretage et fretage)

## Azimuthal deflection

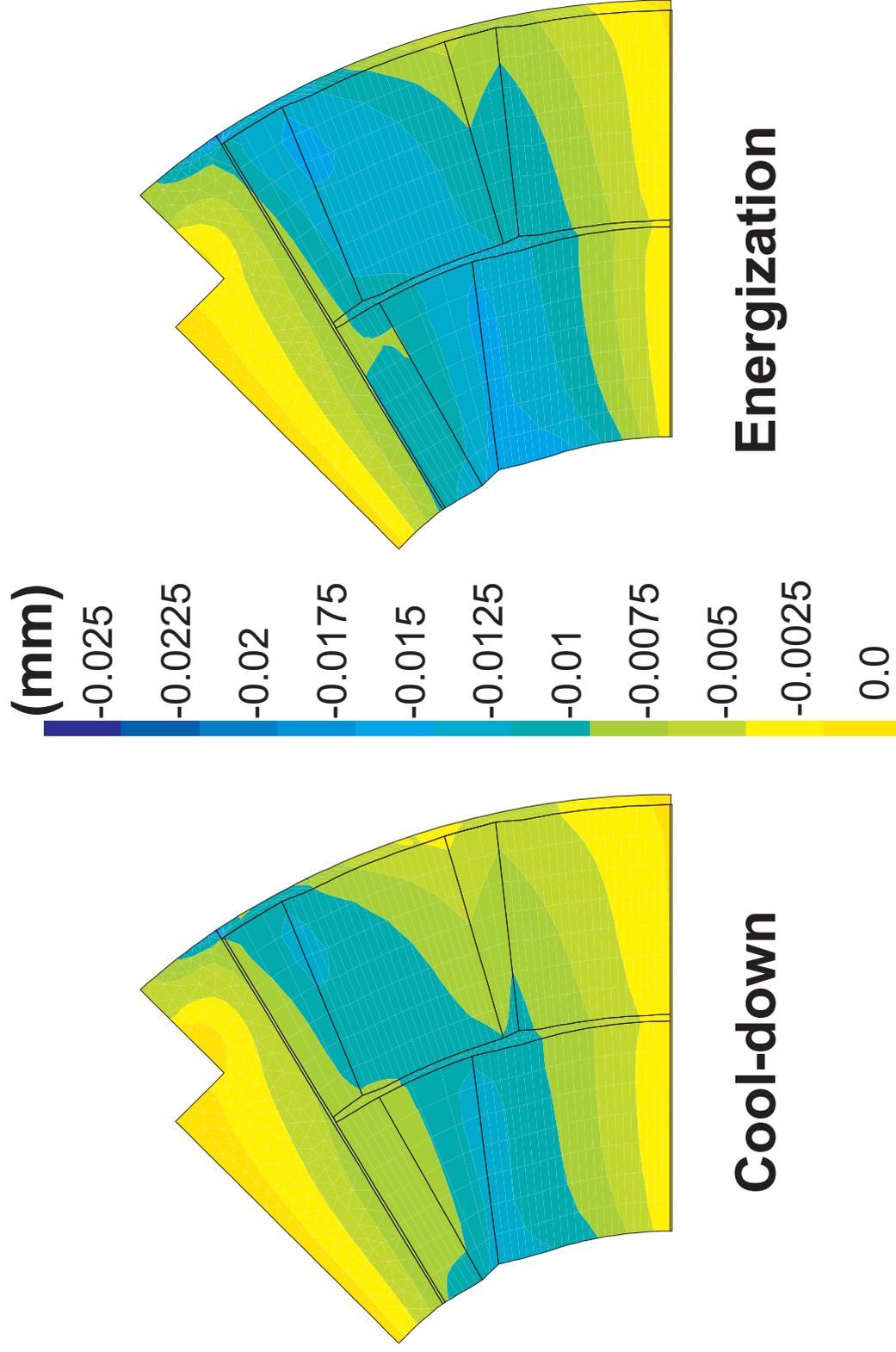


Figure 23 : Déplacement azimuthal dans la bobine (refroidissement et mise sous courant)

## Radial deflection (mm)

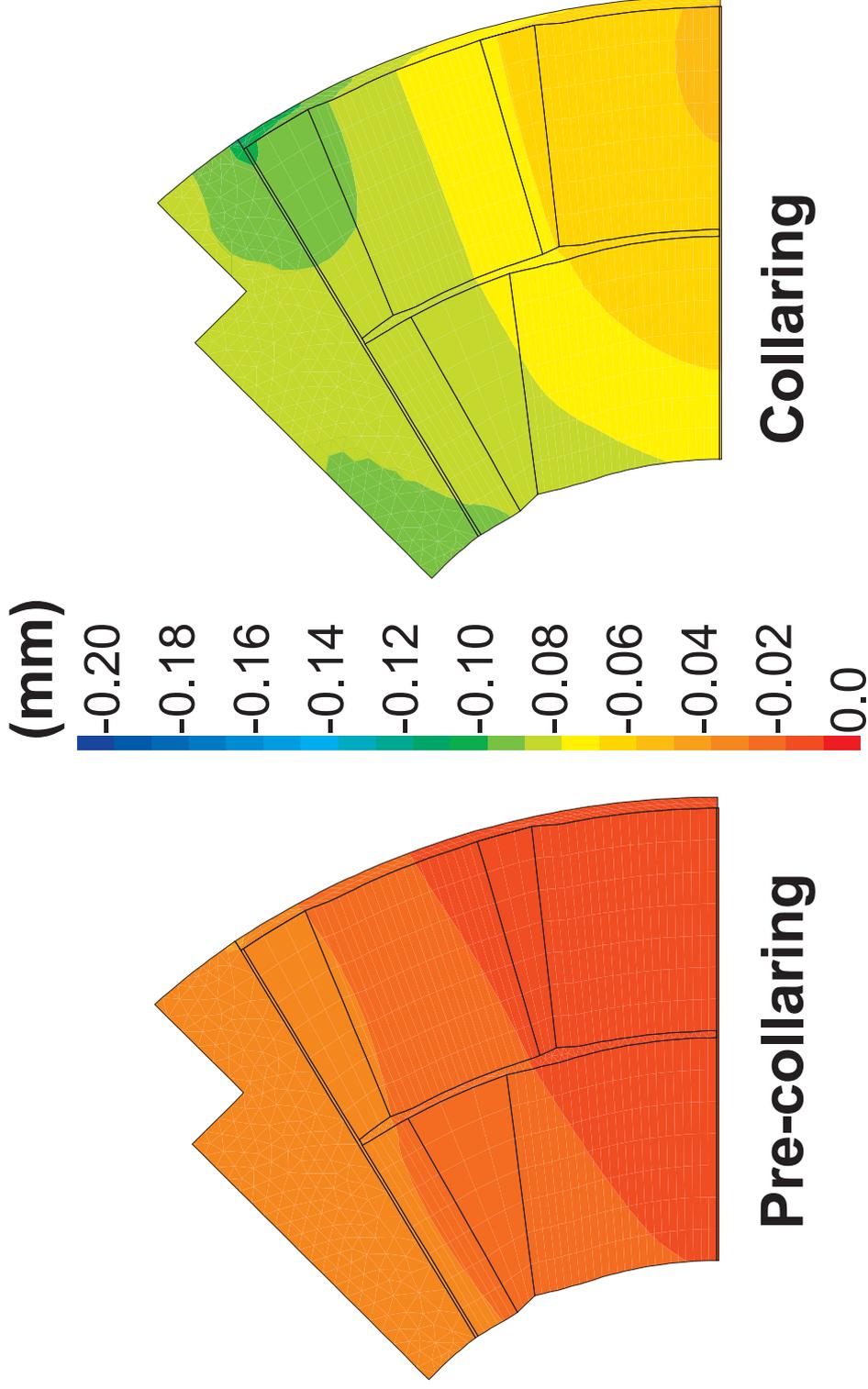


Figure 24 : Déplacement radial dans la bobine (pré-fretage et fretage)

## Radial deflection (mm)

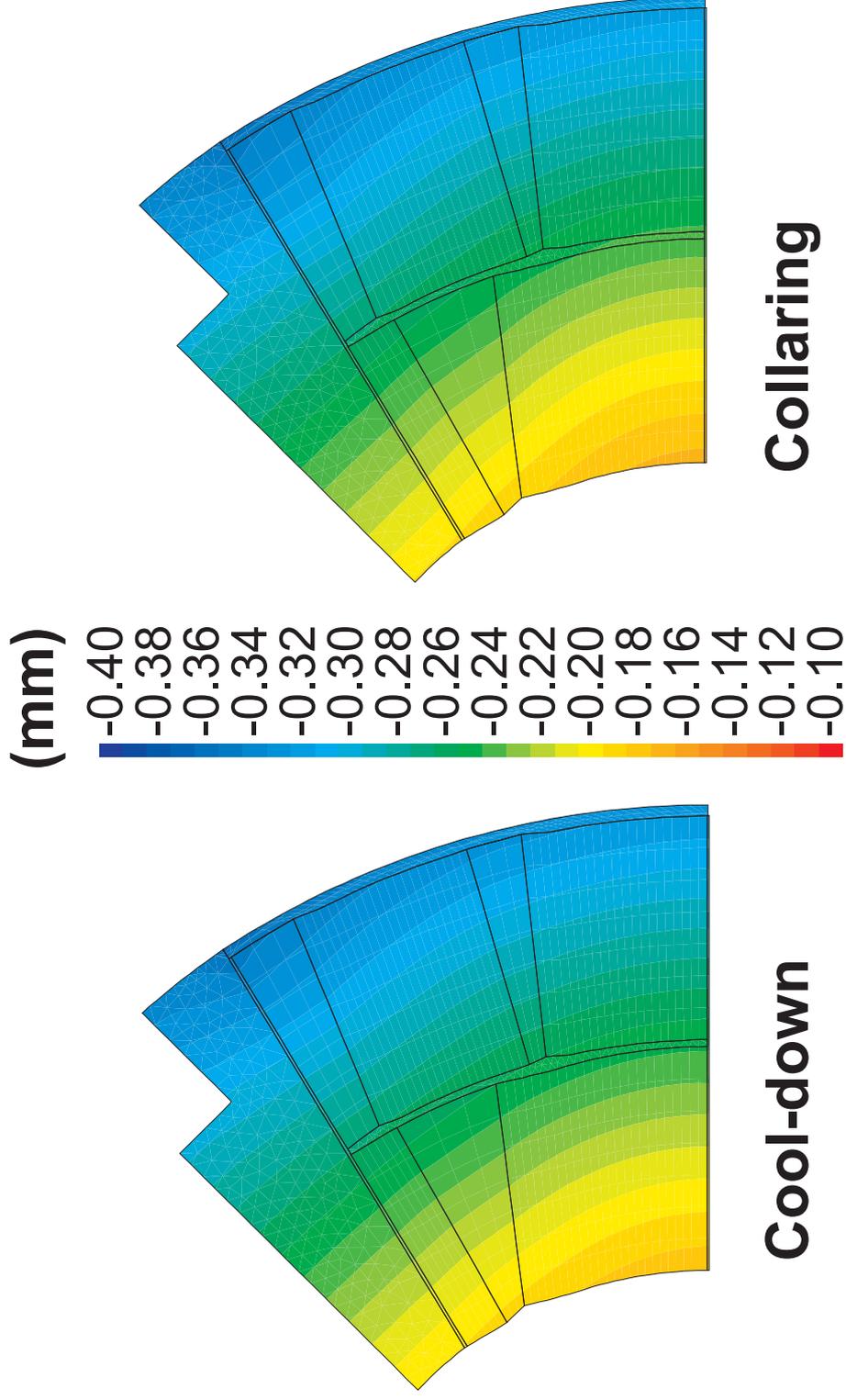


Figure 25 : Déplacement radial dans la bobine (refroidissement et mise sous courant)

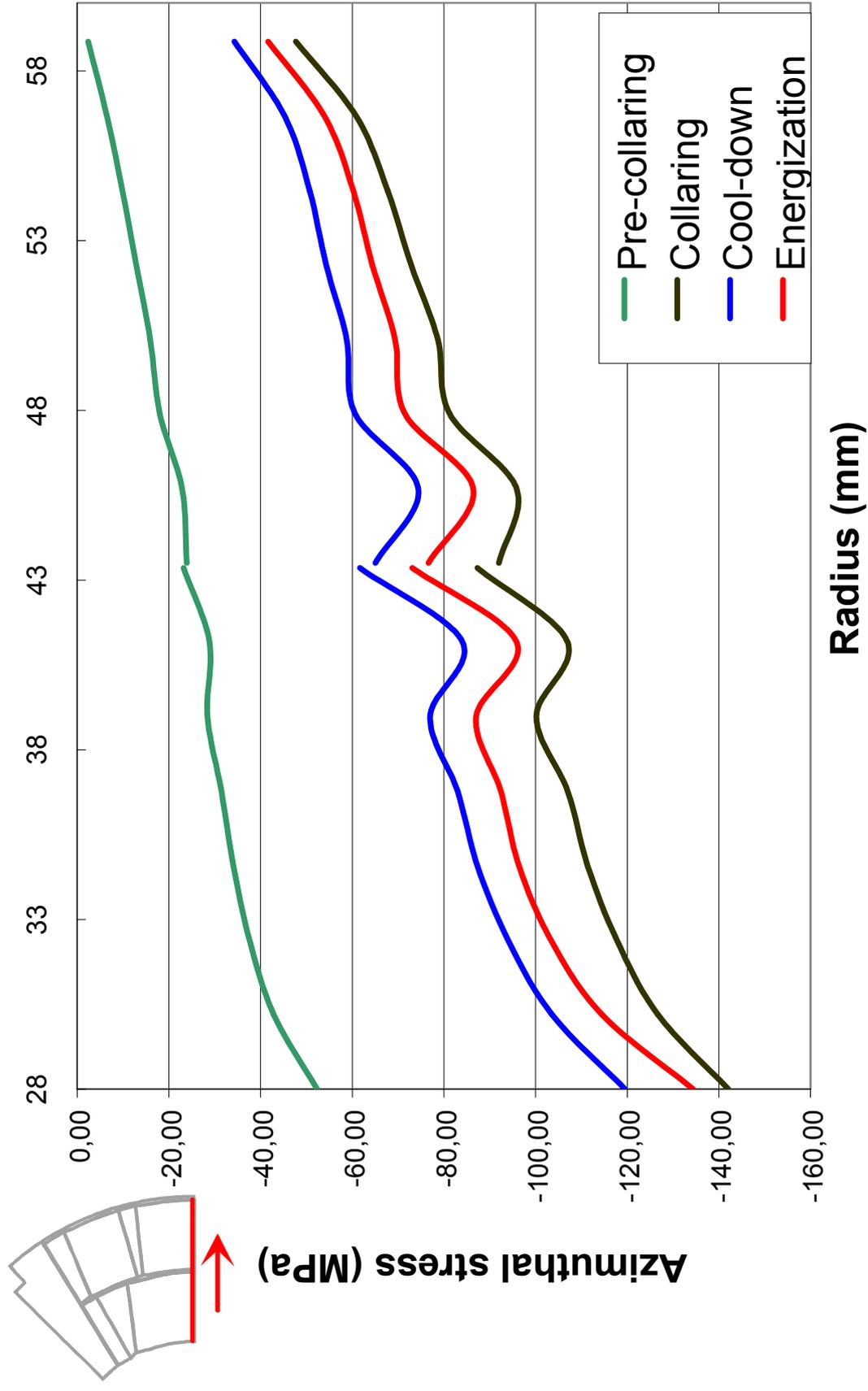


Figure 26 : Evolution de la contrainte azimutale le long du plan médian

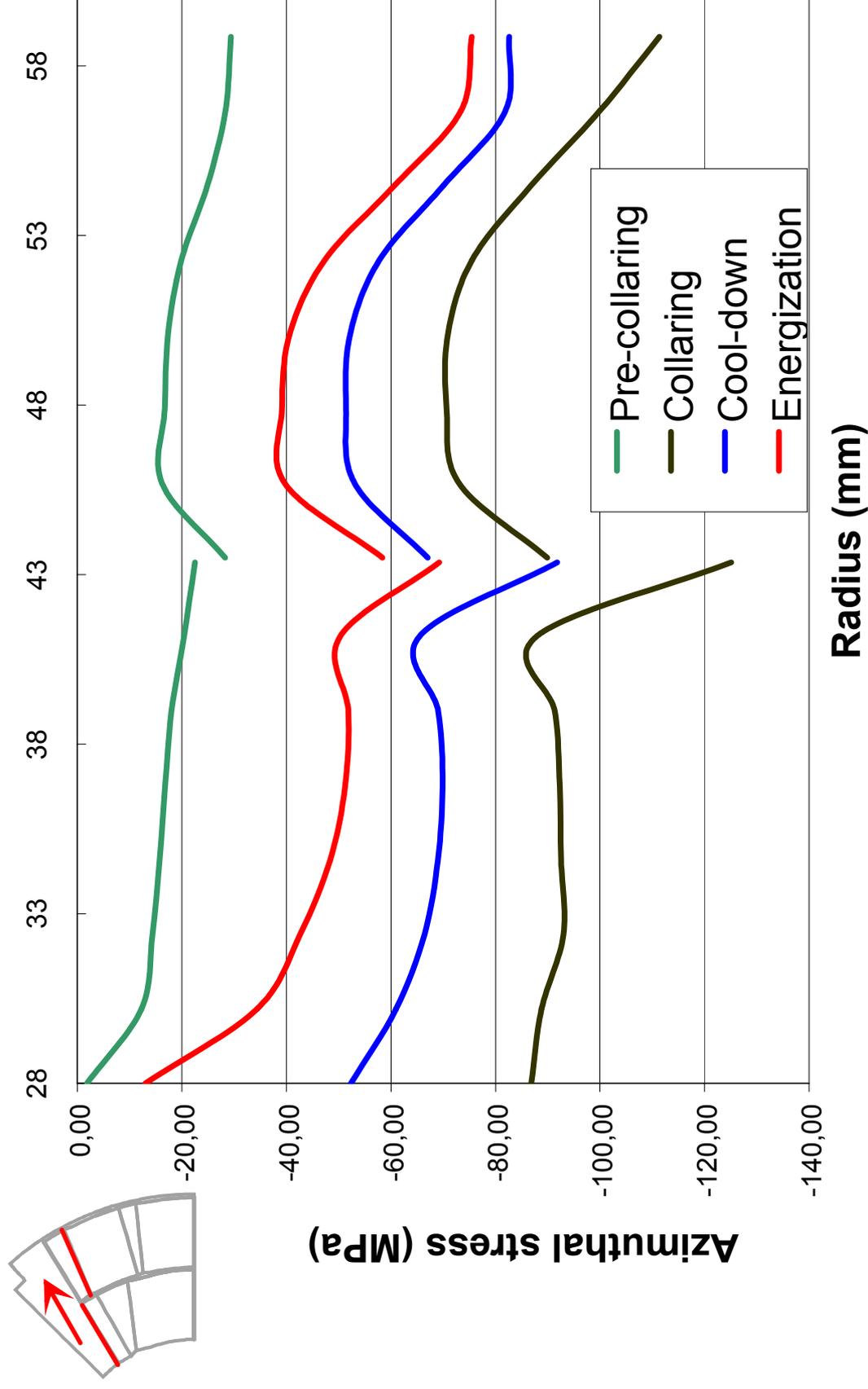


Figure 27 : Evolution de la contrainte azimutale le long du plan polaire

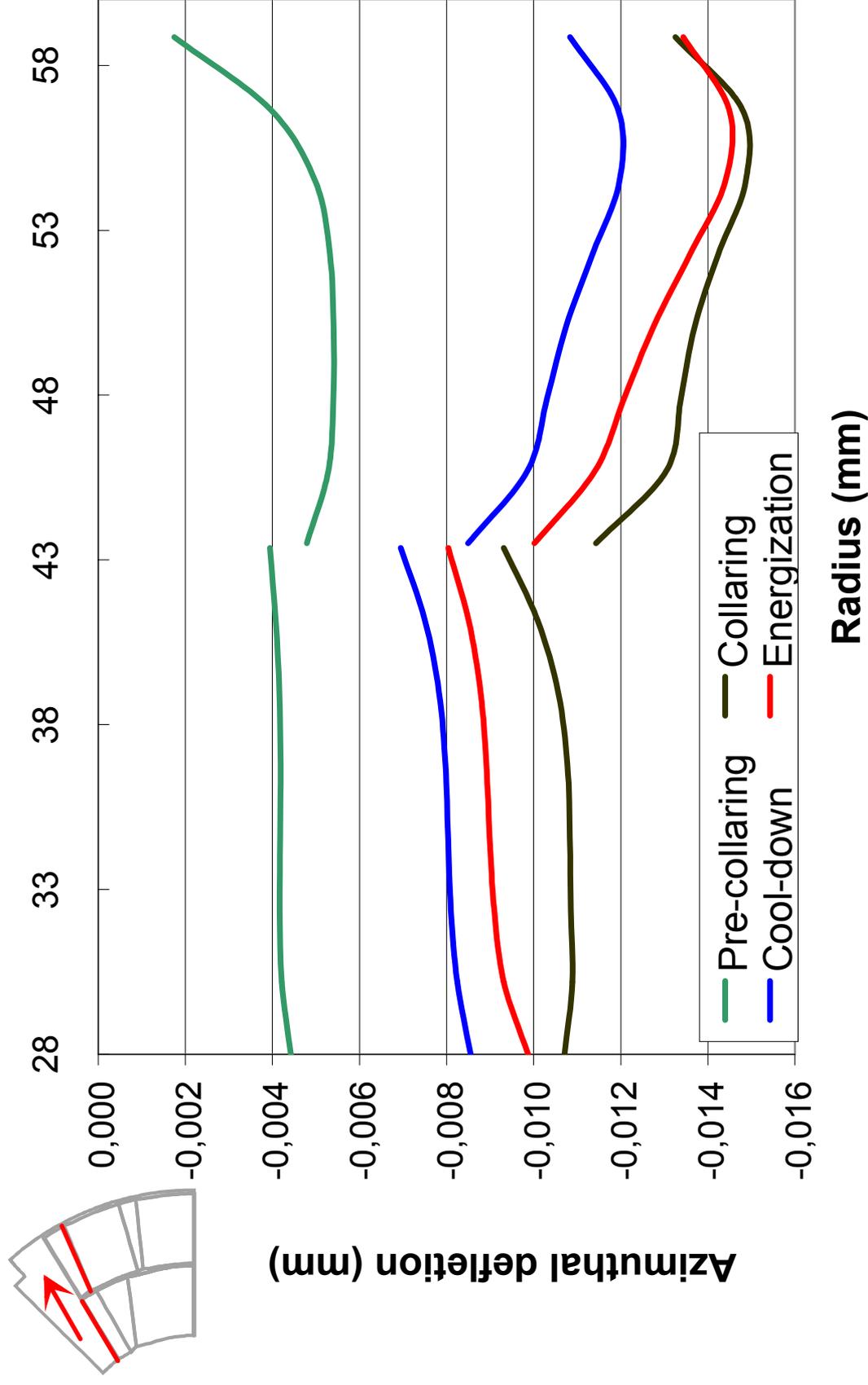


Figure 28 : Evolution du déplacement azimuthal le long du plan polaire

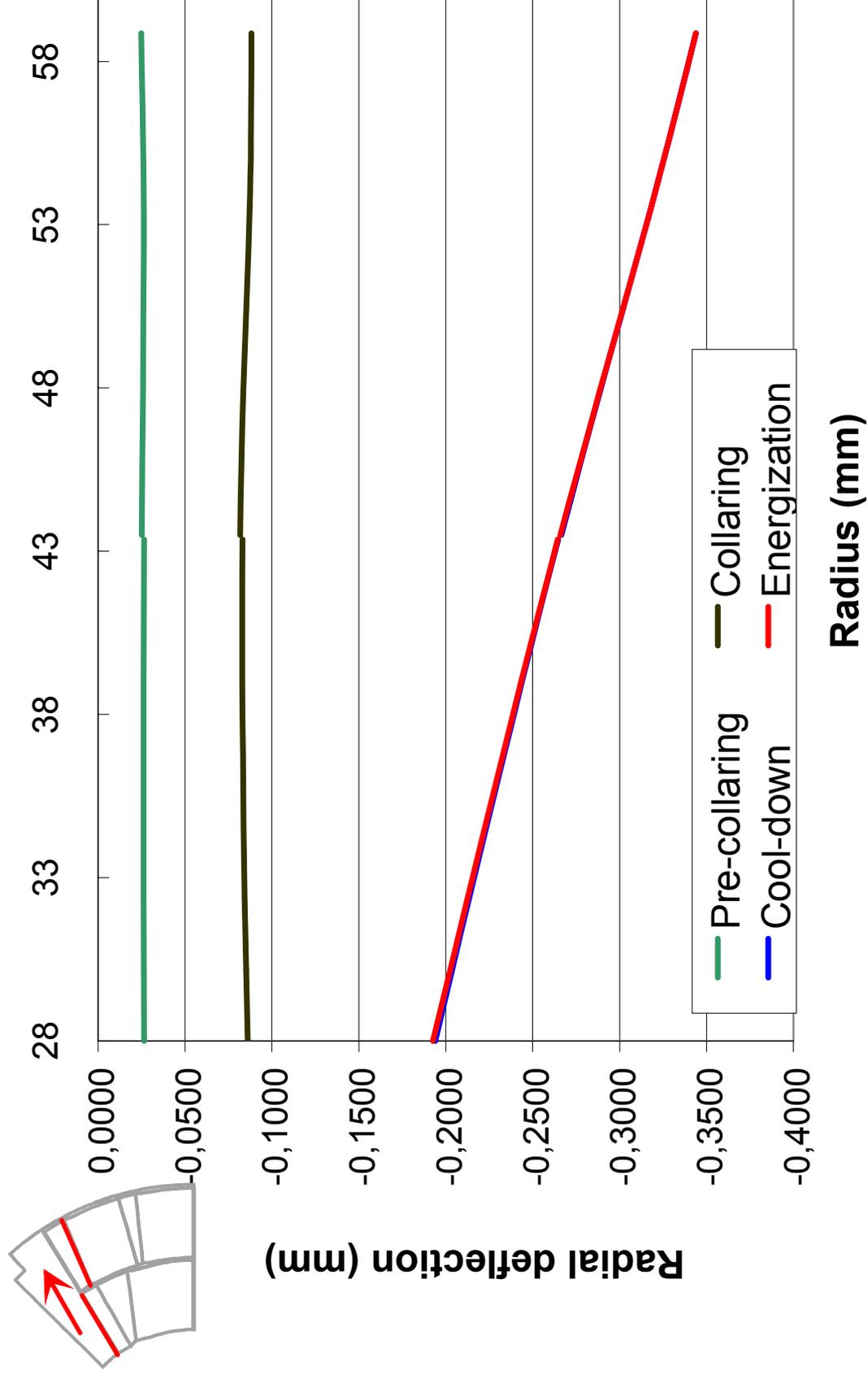


Figure 29 : Evolution du déplacement radial le long du plan polaire

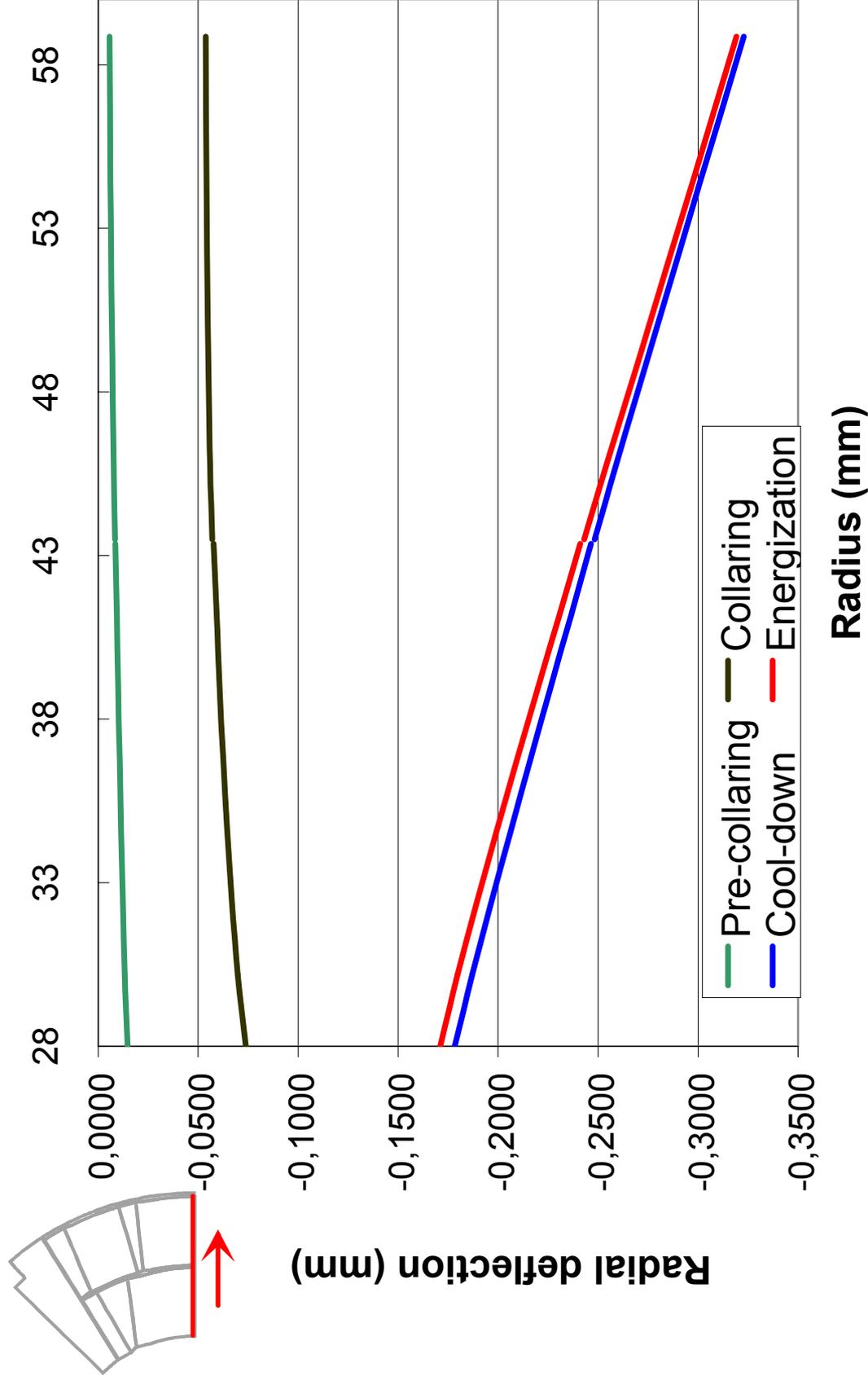


Figure 30 : Evolution du déplacement radial le long du plan médian

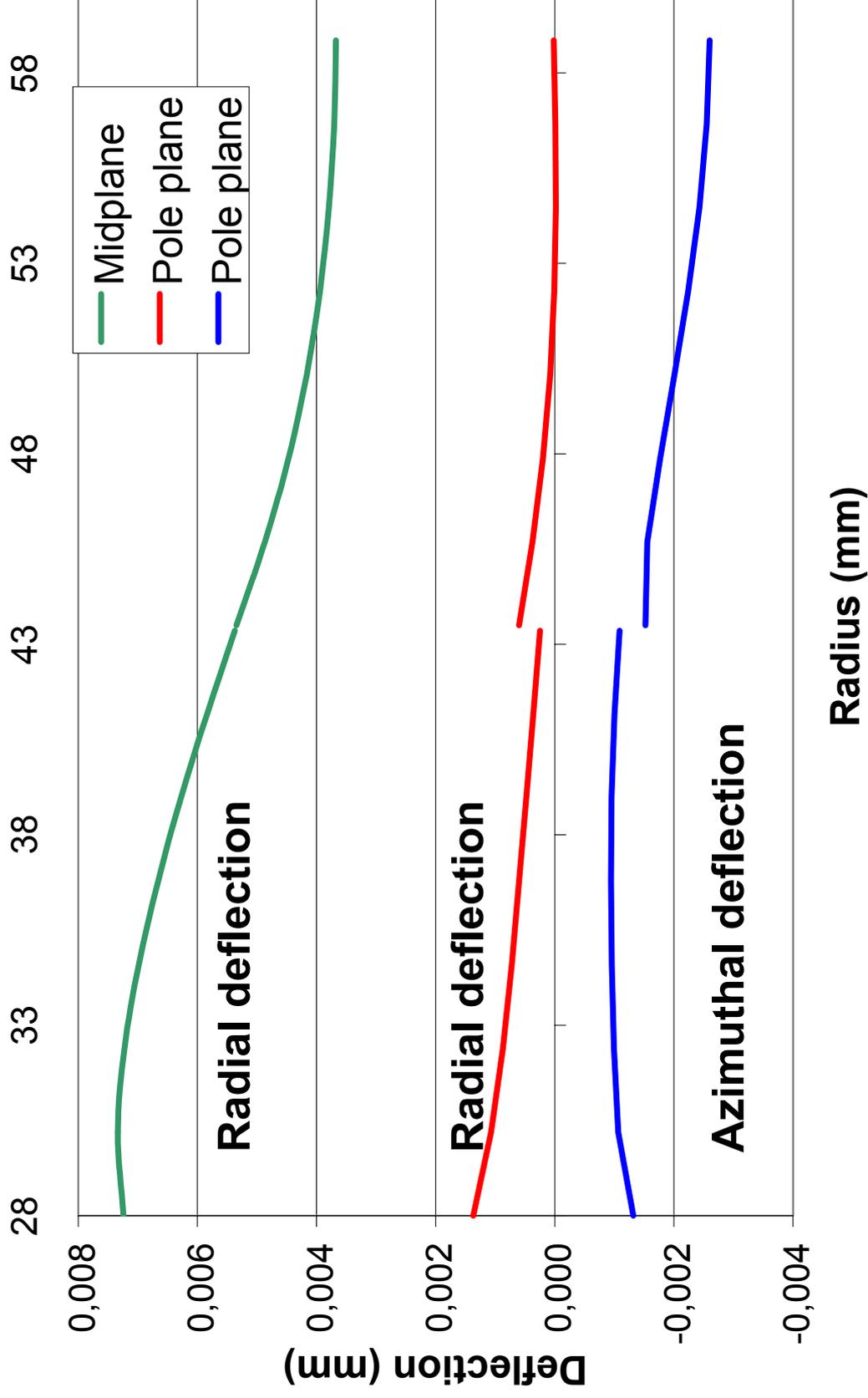


Figure 31 : Evolution du déplacement du uniquement aux efforts de Lorentz