

# SPECIFICATIONS TECHNIQUES POUR LE DOUBLET SEXTUPOLE-OCTUPOLE DE VALIDATION

Date de diffusion	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur	Modifications
2025/09/10	Workpackage Aimant	Responsable du groupe Magnétisme et Insertion  Ingénierie mécanique  Responsable du groupe Physique des accélérateurs  Responsable du groupe Alimentations et aimants pulsés  Groupe Achats	Coordinateur du Programme Construction des accélérateurs	
Destinataires	Soumissionnaires			

# PUBLIC

*La version électronique fait foi.*



# TABLE DES MATIERES

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
<b>2. OBJET : DOUBLET SEXTUPÔLE-OCTUPÔLE DE VALIDATION .....</b>	<b>5</b>
<b>3. SPECIFICATIONS TECHNIQUES DU QUADRUPOLE .....</b>	<b>5</b>
<b>3.1. DESCRIPTION DU DOUBLET .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU DOUBLET .....</b>	<b>6</b>
<b>3.3. DOCUMENTS ASSOCIES.....</b>	<b>8</b>
<b>3.4. USINAGE ET ASSEMBLAGE .....</b>	<b>8</b>
<b>3.5. BOBINES.....</b>	<b>8</b>
3.5.1. GENERALITES .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
3.5.2. ENROULEMENT DE BOBINE.....	9
3.5.3. ISOLATION ET IMPREGNATION DES BOBINES .....	9
3.5.4. CIRCUIT ELECTRIQUE .....	9
3.5.5. CIRCUIT HYDRAULIQUE .....	10
3.5.6. REPARATIONS.....	10
<b>3.6. ÉLÉMENTS DE SECURITE .....</b>	<b>10</b>
<b>3.7. PROTECTION ET PEINTURE .....</b>	<b>10</b>
<b>4. RESPONSABILITES ET OBLIGATIONS DU TITULAIRE.....</b>	<b>11</b>
<b>4.1. RESPONSABILITES DU TITULAIRE .....</b>	<b>11</b>
4.1.1. PERFORMANCE TECHNIQUE .....	11
4.1.2. TOLERANCE .....	11
4.1.3. OUTILLAGE/MONTAGE/TESTS .....	11
<b>4.2. OBLIGATIONS DE LA CONCEPTION ET DE LA FABRICATION.....</b>	<b>11</b>
4.2.1. RAPPORT DE CONCEPTION MECANIQUE .....	11
4.2.2. VARIANTE .....	11
4.2.3. ACCORD POUR EXECUTION .....	11
4.2.4. FABRICATION DETAILLEE ET TESTS .....	12
<b>5. GARANTIE .....</b>	<b>14</b>
<b>6. EXECUTION DU CONTRAT, CALENDRIER ET RAPPORT D'ETAPES.....</b>	<b>14</b>
<b>6.1. PLANNING .....</b>	<b>14</b>
<b>6.2. DEMANDE D'ECARTS PAR RAPPORT AU CAHIER DES CHARGES .....</b>	<b>14</b>
<b>6.3. APPROBATION DES DESSINS .....</b>	<b>14</b>
<b>6.4. RAPPORT D'ETAPES .....</b>	<b>14</b>
<b>6.5. ACCES A L'USINE.....</b>	<b>14</b>
<b>7. ASSURANCE QUALITE .....</b>	<b>15</b>

---

7.1.	ASSURANCE QUALITE .....	15
7.2.	NUMEROTATION .....	15
8.	DOCUMENTATION DU PRODUIT FINAL.....	15
8.1.	ÉLEMENTS DE LA DOCUMENTATION DU PRODUIT FINAL .....	15
8.2.	DESSINS.....	15
8.3.	RAPPORT DE MESURE.....	16
9.	LIVRABLES.....	16
10.	EMBALLAGE ET TRANSPORT .....	16
10.1.	EMBALLAGE.....	16
10.2.	TRANSPORT ET LIVRAISON .....	16

## 1. INTRODUCTION



SOLEIL<sup>1</sup> est le centre français de rayonnement synchrotron situé sur le plateau de Saclay près de Paris. Il s'agit d'un instrument pluridisciplinaire et d'un laboratoire de recherche ayant pour mission de conduire des programmes de recherche en utilisant le rayonnement synchrotron, de développer une instrumentation de pointe sur les lignes de lumière et de mettre celles-ci à la disposition de la communauté scientifique. Le Synchrotron SOLEIL, outil unique à la fois en matière de recherche académique et d'applications industrielles, a ouvert en 2008.

SOLEIL accueille plus de 4000 chercheurs par an, appelés Utilisateurs, qui utilisent pour leur recherche le rayonnement synchrotron à travers un large éventail de disciplines telles que la physique, la biologie, la chimie, l'astrophysique, l'environnement, les sciences de la terre, etc. SOLEIL s'appuie sur une source de rayonnement remarquable à la fois en termes de brillance et de stabilité. Les chercheurs sont accueillis à SOLEIL 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24. SOLEIL reçoit environ 17000 visiteurs toutes catégories confondues par an.

Cette Très Grande Infrastructure de Recherche (TGIR), partenaire de l'Université Paris-Saclay, est constituée en société « civile » fondée conjointement par le CNRS<sup>2</sup> et le CEA<sup>3</sup>. Pour plus de détails, on pourra se reporter au site web : <http://www.synchrotron-soleil.fr/>

Le projet **SOLEIL II** est une modernisation ambitieuse de l'ensemble de l'installation qui permettra des expériences jusqu'à dix mille fois plus rapides, mille fois plus sensibles, avec une résolution à l'échelle du nanomètre, ..., et ainsi de contribuer de manière décisive à de

---

<sup>1</sup> SOLEIL : Source Optimisée de Lumière d'Energie Intermédiaire du LURE\* (\*Laboratoire d'Utilisation du Rayonnement Électromagnétique)

<sup>2</sup> CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

<sup>3</sup> CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives



nombreux enjeux sociétaux dans la recherche sur les matériaux avancés, l'énergie et le développement durable, la santé et le bien-être, l'environnement...

Les premiers approvisionnements pour la construction de SOLEIL II débutent en 2024. Le fonctionnement de l'installation actuelle se poursuivra en parallèle jusqu'à l'automne 2028. Le démarrage de SOLEIL II est prévu pour 2030, avec une montée en puissance jusqu'en 2035.

## 2. OBJET : DOUBLET SEXTUPÔLE-OCTUPÔLE DE VALIDATION

Ce document sert de base pour l'approvisionnement par SOLEIL du doublet sextupôle-octupôle de validation. Il contient les spécifications techniques d'un doublet de validation et décrit les responsabilités et obligations du Titulaire nécessaires pour satisfaire aux exigences énoncées dans le présent document.

## 3. SPECIFICATIONS TECHNIQUES DU DOUBLET

### 3.1. DESCRIPTION DU DOUBLET

Le doublet est composé d'un sextupôle et d'un octupôle fixés par deux pieds sur une embase commune, comme représenté en Figure 1. En plus des bobines nécessaires à la génération du champ magnétique associé à leur fonction principale, chaque aimant est équipé de bobines supplémentaires pour la création de champs magnétiques de correction. Ainsi les bobines additionnelles du sextupôle créent un champ dipolaire horizontal et vertical tandis que celles de l'octupôle créent un champ quadripolaire normal et tourné.

Le circuit magnétique de chaque aimant est constitué de deux demi-culasses, chacune étant composée d'un assemblage de segments élémentaires (respectivement trois pour le sextupôle et quatre pour l'octupôle). Une fine couche de ruban Kapton est collée entre ces segments. Chaque segment est lui-même constitué d'un empilement de tôles minces en acier doux, laminées, collées, et intègre un ensemble de bobines.

Le déculassage des culasses supérieures du doublet permet l'accès à la chambre à vide. Les culasses supérieures et inférieures sont positionnées entre elles à l'aide de goupilles. Afin de minimiser le risque de déformation, les pôles de chaque demi-culasse sont maintenus ensemble au moyen d'une bride en acier inoxydable.

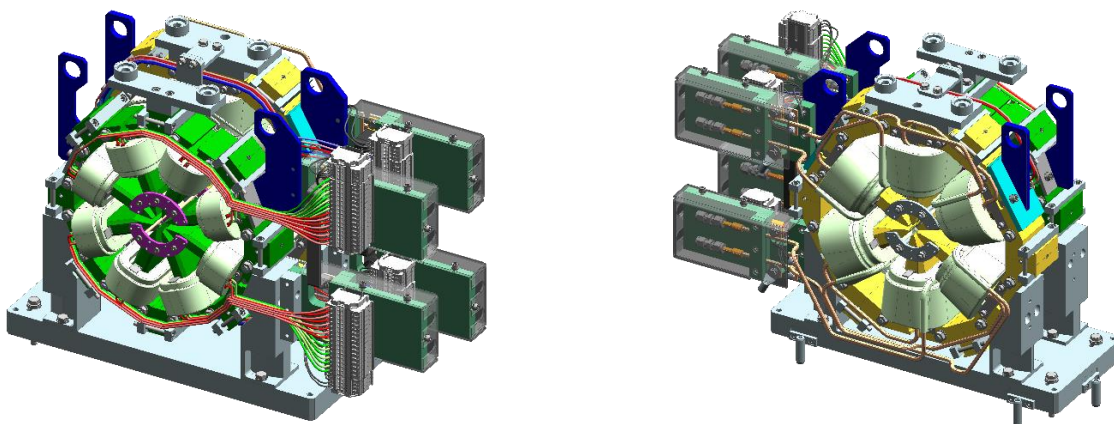


Figure 1 Vue 3D du doublet Sextupôle-Octupôle de Validation

## 3.2. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU DOUBLET

### 3.2.1. PROPOSITION DE BASE

Les principales caractéristiques magnétiques et mécaniques du doublet sont listées dans le Tableau 1 :

**Tableau 1 : principales caractéristiques mécaniques du doublet**

Diamètre de l'ouverture du sextupôle	16 mm
Diamètre de l'ouverture de l'octupôle	21 mm
Longueur mécanique de la culasse du sextupôle	60 mm
Longueur mécanique de la culasse de l'octupôle	60 mm
Longueur hors-tout maximale du sextupôle	122.3 mm
Longueur hors-tout maximale de l'octupôle	106.8 mm
Longueur hors-tout maximale du doublet	234.5 mm
Largeur du doublet (hors cales)	599 mm
Hauteur du doublet (hors cales)	428.6 mm
Poids du doublet	136 kg

Les culasses des aimants du doublet utilisent des laminations du même acier dont les principales caractéristiques sont listées dans le Tableau 2 :

**Tableau 2 : principales caractéristiques des culasses du doublet**

Culasse			
Type d'acier	Laminé à froid entièrement recuit et non orienté		
Coercivité* maximale autorisée	25 A/m		
Épaisseur maximale des laminations	1 mm		
Valeur minimale du facteur d'empilement	0,97		
Variation maximale de la coercivité sur l'ensemble des laminations	±15%		
Valeurs minimales requises d'induction aux valeurs définies du champ H	Champ H (A/m)	Induction minimale (T)	Perméabilité relative minimale
	100	0,65	5172
	300	1,20	3183
	500	1,35	2149
	1000	1,50	1193
	2000	1,60	637
	5000	1,72	274
	8000	1,80	179

\* La coercivité est définie comme le champ requis pour produire une induction nulle dans un échantillon d'acier après des excursions répétées à haute induction avec un champ supérieur à 10 000 A/m. SOLEIL.

Deux conducteurs différents sont utilisés pour le bobinage. Les principales caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 3.

**Tableau 3**

<b>Conducteur 1</b>	
Type de conducteur	creux
Dimension conducteur creux	5 mm x 5 mm
Diamètre du trou de refroidissement	3 mm
Rayon d'arrondi d'angle	0,7 mm
Dénomination du cuivre	Cuivre sans oxygène Cu-OF (désignation ISO) recuit après travail à froid (trempe entièrement recuite).
Composition chimique	> 99,99 % Cu (+Ag)
Teneur en oxygène	< 10 ppm
Résistivité maximale à 23°C	17,4x10 <sup>-9</sup> Ω.m
<b>Conducteur 2</b>	
Type de conducteur	Plein
Dimension conducteur plein	5 mm x 0,8 mm
Rayon d'arrondi d'angle	0,8 mm
Dénomination du cuivre	Cu A1 selon la norme NF A51-050, avec une fine couche isolante (Grade 1)
<b>Conducteur 3</b>	
Type de conducteur	plein
Dimension conducteur plein	4 mm x 0,8 mm
Rayon d'arrondi d'angle	0,8 mm
Dénomination du cuivre	Cu A1 selon la norme NF A51-050, avec une fine couche isolante (Grade 1)

Les caractéristiques des bobines permettant d'obtenir les champs principaux et de correction du doublet sont listées dans le Tableau 4.

**Tableau 4 : principales caractéristiques des bobines de champ principal et de correction du doublet.**

Champ magnétique	Nombre de circuits électriques	Nombre de bobines	Enroulement (Hor. X Ver.)	Conducteur	Longueur moyenne des spires (m)
Sextupolaire	1	6	2 x 16	Cond. 1	0.31
Octupolaire	1	8	4 x 6	Cond. 2	0.29
Dipolaire horizontal	1	6	2 x 19	Cond. 3	0.34
Dipolaire Vertical	1	2 (type 1)	4 x 12	Cond. 3	0.34
		4 (type 2)	2 x 12	Cond. 3	0.34
Quadrupolaire Normal	1	8	2 x 8	Cond. 1	0.23
Quadrupolaire Tourné	1	8	4 x 6	Cond. 2	0.18

Chaque pôle de chaque aimant du doublet embarque un bloc de bobines, composé d'une bobine de champ principal et au moins d'une bobine de champ de correction comme indiqué dans le Tableau 5.

**Tableau 5 : composition des trois blocs de bobines du doublet**

Bloc de bobines	Nombre de Blocs	Aimant	Composition
1.	2	Sextupôle	1 bobine sextupolaire + 1 bobine dipolaire verticale (type1)
2.	4	Sextupôle	1 bobine sextupolaire + 1 bobine dipolaire horizontale + 1 bobine dipolaire verticale (type2)
3.	8	Octupôle	1 bobine octupolaire + 1 bobine quadripolaire normale + bobine quadripolaire tournée

Les bobines à conducteur creux sont connectées à un système hydraulique dont les caractéristiques sont listées dans le Tableau 6.

**Tableau 6 : Circuits hydrauliques du doublet**

	Sextupôle	Octupôle
Nombre de circuits hydrauliques.	2 connectés en parallèle	2 connectés en parallèle
Longueur approximative.	2 x 31 m	2 x 15 m
Température entrée eau	21°C	21°C
Échauffement de l'eau	1.5 °C	0.3 °C
Débit total sous 6 Bars	2 x 0,77 l/min	2 x 1,12 l/min

### 3.2.2. ÉVOLUTION DE LA PROPOSITION DE BASE

SOLEIL **encourage le soumissionnaire** à optimiser l'encombrement des enroulements de la proposition de base afin **de réduire la longueur hors tout de chaque aimant du doublet**, tout en conservant les paramètres magnétiques ainsi que les longueurs mécaniques des culasses indiquées dans le Tableau 1.

## 3.3. DOCUMENTS ASSOCIES

Les dessins du design de référence du doublet Sextupôle-Octupôle de validation sont listés dans la nomenclature jointe en annexe. Ces dessins ainsi que tous les fichiers de données CAO font partie de la spécification. Ces dessins et ces données de CAO sont des données de définition donnant toutes les interfaces et tolérances sur tous les aspects du besoin fonctionnel général.

## 3.4. USINAGE ET ASSEMBLAGE

Un soin particulier doit être apporté à la fabrication afin de garantir les tolérances mécaniques demandées. Il sera recommandé de choisir la méthode traditionnelle pour construire l'aimant, à savoir :

- Découpe laser extrêmement précise de la partie polaire,
- Empilement précis des laminations découpées,
- Assemblage avec collage.

Malgré les tolérances obtenues avec ce procédé, les tolérances mécaniques demandées peuvent nécessiter un usinage. Dans l'affirmative, le fabricant doit indiquer les dimensions de la tôle élémentaire utilisée pour obtenir les dimensions finales telles que spécifiées.

## 3.5. BOBINES



### 3.5.1. ENROULEMENT DE BOBINE

#### 3.5.1.1. BOBINES A CONDUCTEUR CREUX

Le cuivre utilisé pour les bobines doit être exempt de fissures, de porosités. Il ne doit pas avoir de tendance à la fragilisation par l'hydrogène. De très bonnes caractéristiques pour le brasage sont requises ainsi qu'une ductibilité qui permet l'enroulement du conducteur en bobines magnétiques avec des courbures serrées. Aucun joint à l'intérieur de la bobine ne sera autorisé.

Avant l'enroulement de la bobine, le conducteur doit être nettoyé et sablé.

L'isolation électrique entre les tours doit être assurée en enveloppant le conducteur en cuivre d'un ruban de fibre de verre standard, à moitié superposé pour produire une épaisseur d'isolation minimale de 0,4 mm à chaque tour. Une fois l'enroulement terminé, une isolation extérieure du sol doit être assurée par le même isolant d'une épaisseur de 0,4 mm.

Un soin scrupuleux doit être exercé à toutes les étapes de la construction de la bobine, et la manipulation de tous les composants doit être effectuée dans un environnement propre. Toutes les surfaces de travail doivent être nettoyées immédiatement avant d'être utilisées et des gants de protection doivent être portés par tout le personnel concerné. Le contrôle qualité de cette conception devra garantir l'absence de toute occlusion conductrice entre les fils (coupe, poussière ...). En outre, un martelage excessif (durcissement) du conducteur qui pourrait détruire le ruban de fibre de verre doit être évité.

#### 3.5.1.2. BOBINES A CONDUCTEUR PLEIN

Après enroulement, chaque bobine à conducteur plein est enveloppée d'un matériau isolant.

### 3.5.2. ISOLATION ET IMPREGNATION DES BOBINES

Pour former les trois blocs de bobines listés dans le Tableau 5, les bobines à conducteurs creux et pleins doivent être enveloppées, imprégnées ensemble sous vide, de résine époxy résistante aux radiations ( $10^7$  Gray) qui sera polymérisée sous pression. L'ensemble des bobines de correction de chaque bloc de bobines doit être au préalable enveloppé d'un ruban de fibre de verre standard. L'isolant utilisé doit être conçu pour tolérer une température de 70°C sans défaillance mécanique ou électrique.

Lors de l'imprégnation, le dégazage de la résine époxy doit être contrôlé avec soin. L'utilisation d'un moule est essentielle pour obtenir les tailles des blocs de bobines, c'est pourquoi le fabricant doit le concevoir. Toutes les parties creusées doivent être remplies de fibre de verre avant imprégnation afin d'éviter les blocs de résine pure.

Une fois terminée, la résine sur le bloc de bobines doit être entièrement transparente, sans colorant ni additif qui limiteraient l'observation des tours de cuivre utilisés. Aucune peinture ou autre revêtement extérieur ne sera autorisé.

### 3.5.3. CIRCUIT ELECTRIQUE

#### 3.5.3.1. BOBINE A CONDUCTEUR CREUX

Des terminaisons électriques doivent être installées sur les conducteurs creux pour la mise en série électrique des différentes bobines.

Chaque circuit électrique formé par les différentes bobines à conducteur creux mises en série doit inclure deux trous lisses débouchant de 6 mm de diamètre pour permettre la fixation de deux câbles d'alimentation, non inclus dans la fourniture.

Chaque circuit électrique doit être isolé du sol avec une résistance supérieure à 10 MΩ en présence d'une tension directe supérieure à 5 kV.

#### 3.5.3.2. BOBINE A CONDUCTEUR PLEIN

Les terminaisons des bobines à conducteur plein doivent permettre la brasure d'un fil rond sur le fil rectangulaire du conducteur plein, et la connexion et la fixation par vis de l'extrémité libre du fil rond dans les contacts d'un bornier. Chaque terminaison du jeu de bobines à conducteur plein doit être étiquetée (par exemple, les terminaisons du 2<sup>ème</sup> pôle peuvent être 2a, 2b les terminaisons du 3<sup>ème</sup> pôle peuvent être 3a, 3b, 3c et 3d). L'étiquetage sera soumis à SOLEIL pour approbation.

#### 3.5.4. CIRCUIT HYDRAULIQUE

Sur chaque aimant du doublet, des terminaisons hydrauliques doivent être installées sur les conducteurs creux pour :

- La mise en série hydraulique des bobines de la culasse supérieure (respectivement inférieure),
- La connexion hydraulique en parallèle des bobines de culasse inférieure avec celles de la culasse supérieure au moyen de collecteur.

Hormis le conducteur creux en cuivre, tout composant du circuit hydraulique en contact avec de l'eau désionisée (tel que collecteurs, raccord, connecteur...) doit être en acier inoxydable. Une connexion flexible en polyamide PA11 spécial pour eau désionisée et avec une résistance de plus de 30 MΩ sous 3000 V pour une longueur nominale de 500 mm est autorisée entre les bobines et les collecteurs. Si nécessaire, une transition intermédiaire cuivre-acier inoxydable brasée à l'argent est également autorisée.

#### 3.5.5. REPARATIONS

Aucune bobine ne doit être réparée après son imprégnation initiale sans l'autorisation écrite de SOLEIL.

### 3.6. ÉLEMENTS DE SECURITE

Les terminaisons électriques et d'eau doivent être confinées dans un grillage de protection amovible en matériau isolant à concevoir selon la norme électrique française NF C 15-100. Cette protection doit cependant permettre la connexion des aimants du doublet au réseau d'électricité et d'eau de SOLEIL.

Chacun des circuits hydrauliques sera équipé de deux vigithermes (type Elmwood ou Heito) à la sortie. Ces vigithermes seront connectés en série dans le circuit de sécurité de chaque aimant du doublet. Le seuil thermique sera de  $65^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

### 3.7. PROTECTION ET PEINTURE

Après assemblage et contrôle, toute pièce sensible à la corrosion devra être protégée contre la rouille par une peinture époxy à deux composants. La peinture doit être dure et résistante mécaniquement. Les faces d'accouplement et les rainures d'alignement ne seront pas peintes et doivent être protégées par phosphatation ou traitement de surface similaire. Le fabricant doit également veiller à ce que toutes surfaces sur les faces des pôles ou d'autres faces de l'aimant qui seront nécessaires pour les mesures mécaniques sur les aimants assemblés restent non peintes. Ces zones non peintes doivent être protégées par une huile légère ou d'autres techniques préventives contre la rouille. La peinture du sextupôle doit être de couleur jaune (RAL 1023) tandis que celle de l'octupôle verte (RAL 6037).

## 4. RESPONSABILITÉS ET OBLIGATIONS DU TITULAIRE

### 4.1. RESPONSABILITES DU TITULAIRE

#### 4.1.1. PERFORMANCE TECHNIQUE

Conformément aux spécifications techniques de ce document et à tous les documents référencés, le Titulaire est responsable de la conception mécanique, de la fabrication et de l'assemblage du doublet Sextupôle-Octupôle de validation. Le Titulaire testera l'équipement dans son entreprise, puis livrera l'aimant à SOLEIL. Le Titulaire n'est pas responsable de la conception magnétique de l'électroaimant. Il est de la responsabilité du Titulaire de s'assurer que l'équipement est conforme à toutes les exigences de spécification.

#### 4.1.2. TOLERANCE

Il est de la responsabilité du Titulaire de s'assurer de la conformité des tolérances générales spécifiées sur les dessins d'assemblage du doublet Sextupôle-Octupôle de Validation. À cet effet, une cotation et un tolérancement appropriés seront effectués par le Titulaire sur chaque dessin des éléments constituant le doublet Sextupôle-Octupôle de Validation.

#### 4.1.3. OUTILLAGE/MONTAGE/TESTS

Le Titulaire est responsable de la fourniture de tous les matériaux, y compris (mais sans s'y limiter) la construction de tous les outils, gabarits, montages et équipements d'essai nécessaires à la fabrication et à l'installation de l'aimant. L'outillage spécifique peut être :

- Un four pour cuisson des tôles laminées,
- Des mandrins de bobinage,
- Des moules d'imprégnation.

### 4.2. OBLIGATIONS DE LA CONCEPTION ET DE LA FABRICATION

#### 4.2.1. RAPPORT DE CONCEPTION MECANIQUE

Le Titulaire devra fournir un rapport détaillant la conception mécanique de l'électroaimant. Ce rapport sera présenté à une réunion de validation. Ce rapport doit inclure à minima :

- Le nom du Titulaire et le nom commercial de l'acier et du conducteur pour la bobine,
- La conception technique finale et les dessins de fabrication,
- Le détail de la méthode d'empilement et de fixation des laminations en sous-ensembles de culasses individuelles afin d'obtenir les tolérances mécaniques requises pour les blocs individuels,
- Les usinages critiques et les calculs d'empilement de tolérance d'usinage et d'assemblage,
- Le planning de conception,
- Le rapport d'étapes tous les mois avec mises à jour du planning,
- Tous les autres dessins pertinents sur papier et support électronique.

#### 4.2.2. VARIANTE

À la fin de la conception mécanique, le Titulaire peut proposer un scénario alternatif pour fabriquer l'aimant. Dans ce cas, il devra prouver qu'il est conforme à toutes les exigences stipulées dans ce présent document.

#### 4.2.3. ACCORD POUR EXECUTION

SOLEIL doit approuver par écrit le rapport de conception mécanique, incluant toute modification introduite durant la réunion de validation, avant que le Titulaire ne procède à la commande de matériaux, de composants et à l'usinage.

#### 4.2.4. FABRICATION DETAILLEE ET TESTS

##### 4.2.4.1. CULASSE

###### 4.2.4.1.1. MESURE MAGNETIQUE DE L'ACIER LAMINE

Les échantillons d'acier doivent faire l'objet de mesures à l'aide d'une technique d'échantillonnage « en anneau » ou « mixte » pour déterminer :

- La perméabilité à toutes les valeurs d'induction spécifiées dans le tableau 1,
- La coercivité telle que définie dans le tableau 1.

L'acier étant « non orienté », son induction mesurée perpendiculairement au sens de laminage ne devra pas être inférieure à 80% des valeurs indiquées dans le tableau 1. Cette mesure peut être effectuée par le fabricant lui-même ou recueillie auprès du fournisseur d'acier.

###### 4.2.4.1.2. CONTROLE DE L'ISOLATION

L'isolation de surface doit être vérifiée sur trois échantillons initiaux en utilisant la technique de mesure d'isolation standard du fabricant d'acier conforme à la norme nationale ou européenne appropriée.

###### 4.2.4.1.3. ESSAIS DE DECOUPE PAR LAMINAGE

Avant le début de la production, un certain nombre de laminations seront découpées et trois d'entre elles seront mesurées. Dans le même temps, trois tôles doivent être mises à la disposition de SOLEIL pour une vérification indépendante des tolérances dimensionnelles. Le Titulaire préviendra SOLEIL au moins 2 semaines avant les mesures. SOLEIL se réserve le droit d'être présent lors de ces mesures. Les tôles d'essai, dûment marquées d'une étiquette d'identification, doivent ensuite être conservées pour référence ultérieure éventuelle.

###### 4.2.4.1.4. ASSEMBLAGE

Lors de l'empilage et la compression des tôles, le fabricant devra prendre toutes les précautions nécessaires pour obtenir une lamination uniformément répartie sur toute la longueur de la pile.

Après l'empilage, la pile doit être inspectée pour s'assurer que toutes les laminations sont en contact avec la surface de référence de l'outillage de pressage.

Lors de l'assemblage initial de l'aimant, le Titulaire est tenu de noter le poids des laminations utilisées pour l'assemblage de chaque sous-ensemble quadrant. Le facteur d'empilement de 0,97 doit être assuré comme valeur minimale

###### 4.2.4.1.5. CONTROLES DIMENSIONNELS

Après assemblage et usinage des laminations, les principales dimensions géométriques seront soigneusement vérifiées en fonction des tolérances des dessins concernés.

Après l'assemblage des deux demi-culasses, les tolérances fonctionnelles seront finalement vérifiées, y compris les interfaces avec les supports et le système de référence d'enquête. Dans le plan médian longitudinal, le profil de chaque pôle sera contrôlé en dix points répartis uniformément le long du profil du pôle. Les intercornes sont également contrôlés.

##### 4.2.4.2. BOBINES

###### 4.2.4.2.1. AVANT ENROULEMENT DES CONDUCTEURS

Le conducteur creux doit permettre le libre passage d'une bille de 1,0 mm de diamètre. Le conducteur doit être soumis à un essai hydraulique à une pression statique de 100 bars pendant 10 minutes. Les conducteurs révélant toute preuve de fuite doivent être rejetés.

#### 4.2.4.2.2. APRES ENROULEMENT

Avant la brasure des terminaisons, le passage d'une bille de diamètre 1 mm doit être effectué. La terminaison brasée doit être testée à une pression de 60 bars pendant 10 minutes et testée en tirant avec une tension de 4 daN/mm<sup>2</sup>.

#### 4.2.4.2.3. ISOLATION MASSE

Pour tester l'isolation de masse, chaque bobine doit être immergée dans l'eau. Avant les essais électriques, plusieurs cycles thermiques doivent être appliqués par refroidissement/réchauffement par eau (10 cycles augmentant la température de la bobine de 20 °C à 45 °C). L'essai d'isolation de masse doit être effectué en utilisant une tension de 5 kV pendant 1 minute. La résistance d'isolation doit être supérieure à 50 MΩ.

#### 4.2.4.2.4. MESURE DES FUITES

Après séchage, le courant de fuite doit être mesuré en utilisant une tension jusqu'à 5 kV. La masse doit être créée par des feuilles d'aluminium enveloppées ou par un autre procédé.

#### 4.2.4.2.5. ISOLATION INTERTOURS

Immédiatement après les mesures de fuite décrites au 4.3.4.2.4, une tension alternative de 20 V/tour doit être appliquée pendant 1 minute. La bobine doit être utilisée comme l'enroulement secondaire d'un transformateur. Une tension minimale de 20 V/tour doit être induite à travers les extrémités de la bobine à une fréquence de 500 Hz.

Le courant primaire doit être enregistré et devra rester constant pendant l'essai (une autre méthode peut être proposée).

#### 4.2.4.2.6. RESISTANCE DES BOBINES

La résistance électrique de toutes les bobines doit être mesurée à l'aide d'un pont de mesure en courant continu (pont CC). La valeur doit être corrigée à 21°C et doit se situer à  $\pm 1$  % de la valeur moyenne pour toutes les bobines.

#### 4.2.4.2.7. MESURE DU DEBIT

Après imprégnation et terminaisons de brasage, le débit d'eau doit être mesuré pour chaque bobine, pour une différence de pression de 6 bars et une pression de 12 bars en amont de chaque bobine.

#### 4.2.4.2.8. TEST STATIQUE

Afin de détecter les microfissures, un test de pression d'eau à 18 bars minimum sera nécessaire pour chaque bobine.

#### 4.2.4.3. TESTS DE L'AIMANT ASSEMBLE

Après complétion de l'assemblage, le doublet Sextupôle-Octupôle de Validation sera contrôlé pour s'assurer qu'il est conforme aux dimensions spécifiées dans les dessins d'assemblage appropriés.

Seront vérifiés :

- La position des bobines par rapport aux culasses,
- Les dimensions selon les dessins d'assemblage d'aimants appropriés,



- Le débit total sous pression différentielle de 6 bars et avec une pression à l'entrée du doublet fixée à 12 bars
- Les vigithermes,
- L'isolation à la terre sous 3 kV pendant 1 minute.

## 5. GARANTIE

Le matériel est garanti un (1) an minimum à compter de l'admission définitive du matériel par SOLEIL.

## 6. EXÉCUTION DU CONTRAT, CALENDRIER ET RAPPORT D'ÉTAPES

### 6.1. PLANNING

Le planning suivant n'est fourni qu'à des fins informatives. Le planning renseigné dans le contrat prévaudra.

*Tableau 7 : Planning en semaines après notification de la commande*

Revue de conception	T0+4
Livraison du doublet à SOLEIL	T0+28

Le Titulaire doit fournir dans un délai de 5 jours à compter de la notification de la commande un programme de GANTT détaillant les calendriers de fabrication et d'essais. Le programme comprendra des dates prévues pour l'inspection et les essais. Il sera mis à jour mensuellement en rapportant l'avancement effectué.

### 6.2. DEMANDE D'ECARTS PAR RAPPORT AU CAHIER DES CHARGES

Lors de l'exécution du contrat, tout écart par rapport à cette spécification demandée par le Titulaire sera soumis à SOLEIL par écrit pour approbation.

### 6.3. APPROBATION DES DESSINS

Les dessins établis par le Titulaire seront soumis à SOLEIL pour approbation fonctionnelle.

### 6.4. RAPPORT D'ÉTAPES

Un rapport d'avancement écrit est envoyé à SOLEIL le 5<sup>e</sup> jour de chaque mois jusqu'à la livraison finale. Tout retard au planning doit explicitement être inclus dans ce rapport. Une visioconférence sera tenue mensuellement dans les 5 jours suivant la réception du rapport.

### 6.5. ACCES A L'USINE

SOLEIL et ses représentants ont libre accès pendant les heures normales de travail aux sites de fabrication ou d'assemblage du doublet Sextupôle-Octupôle de Validation, y compris les locaux de tout sous-traitant pendant la durée du contrat. Le Titulaire donnera un préavis de quinze jours pour l'inspection et les tests, SOLEIL donnera un préavis de huit jours avant toute visite.

## 7. ASSURANCE QUALITÉ

### 7.1. ASSURANCE QUALITE

Le Titulaire doit être en mesure de démontrer qu'il possède une certification de la série ISO 9000 ou une certification équivalente de contrôle de la qualité appropriée à l'objet de la spécification.

Le Titulaire fournira à SOLEIL, pour approbation, ses procédures de contrôle de la qualité qui seront alignées sur la norme ISO 9000. SOLEIL donnera son acceptation ou son refus de la procédure par écrit dans les dix jours suivant la réception.

### 7.2. NUMEROTATION

Chaque bloc de bobine individuel et chaque bloc de culasse seront identifiés et numérotés. Le numéro d'identification est apposé au pochoir sur le composant à une position convenue, comme indiqué sur les dessins du Titulaire approuvés par SOLEIL. Une plaque signalétique sera fixée sur l'aimant.

## 8. DOCUMENTATION DU PRODUIT FINAL

Tous les documents livrés par le Titulaire doivent être rédigés en français.

### 8.1. ÉLÉMENTS DE LA DOCUMENTATION DU PRODUIT FINAL

Le Titulaire doit fournir en papier et une copie PDF du dossier de documentation du produit fini conformément au calendrier établi dans le contrat. Fourni à la livraison de l'aimant, ce dossier doit comprendre la documentation suivante :

- Rapport de conception,
- Dessins de construction de l'aimant,
- Certificat de matériau pour la lamination et le conducteur,
- Les mesures magnétiques des échantillons de lamination,
- Un travelier des contrôles exécutés à chaque étape de la fabrication,
- Documents d'inspection à la source (les inspections à la source seraient celles effectuées chez un sous-traitant de l'entrepreneur),
- Un livret de fabrication composé :
  - a. Des essais mécaniques, hydrauliques et électriques des bobines,
  - b. Des essais mécaniques, hydrauliques et électriques de l'assemblage de la culasse,
  - c. Des essais mécaniques, hydrauliques et électriques de l'aimant assemblé,
  - d. Des résultats de la réception finale,
  - e. De la liste des non-conformités traitées

Le Titulaire devra assurer l'archivage des documents qui ne seront pas envoyés à SOLEIL pendant la période de garantie. Après ce délai, ces documents seront livrés à SOLEIL ou détruits avec son accord.

### 8.2. DESSINS

À la fin du contrat, tous les plans 2D et maquettes 3D doivent être fournis au format numérique en version TQC (Tel Que Construit).

- Les plans 2D à la fois au format PDF et dans le format natif du logiciel de CAO utilisé
- La maquette 3D conforme à l'ensemble réalisé (TQC) au format PRT (SIEMENS NX) ou en STEP ISO 214

Le logiciel CAO officiel de SOLEIL est SIEMENS NX, version 2406.

### 8.3. RAPPORT DE MESURE

Les rapports de mesures effectuées lors de l'exécution du contrat doivent être fournis en format papier et électronique (fichier PDF). Une copie des mesures sera envoyée en format texte (fichiers .txt).

## 9. LIVRABLES

Le Titulaire doit fournir les éléments suivants :

*Tableau 8 : Liste des livrables*

Item	Délivrable	Échéance	Approbation requise
1	Le planning de GANTT	5 jours après notification de la commande	Oui
2	Rapport d'avancement	5 <sup>e</sup> jour de chaque mois	Non
3	Rapport de conception	5 jours avant la revue de conception	Oui
4	Réception de l'aimant à SOLEIL	Comme défini dans le contrat	Oui
5	Documentation finale	Avec la livraison de l'aimant	Oui

## 10. EMBALLAGE ET TRANSPORT

### 10.1. EMBALLAGE

Le Titulaire soumettra à SOLEIL une solution pour l'emballage. Cet emballage devra impliquer l'utilisation des outils de manutention classiques. Les dispositifs emballés doivent être protégés contre les éléments, les projections et les ruptures pour le transport et le stockage. L'emballage de l'aimant doit être étanche à la poussière, à l'eau et devra protéger les pièces en acier contre l'oxydation. En outre, les pièces doivent être protégées contre la déformation, les chocs et les frottements qui peuvent endommager leurs surfaces.

Une protection particulière doit être exigée pour les pièces fragiles (surfaces de référence, connexions électriques et bobines).

Les bobines doivent être rincées, séchées et scellées avant l'expédition afin d'éviter le gel.

### 10.2. TRANSPORT ET LIVRAISON

Le Titulaire inclura dans son offre le transport de l'usine au site SOLEIL où SOLEIL contrôlera et mesurera l'aimant.

Le Titulaire conserve la responsabilité des marchandises jusqu'à la livraison dans le site de SOLEIL. SOLEIL fournira les outils de manutention locaux (il est à noter que SOLEIL ne possède pas de quai de déchargement).

Le transfert des risques a lieu lorsque la charge est posée au sol.