

# CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES (CCTP)

## MISSION D'ANALYSE ET CALCULS DE SIMULATION NUMERIQUE EN MECANIQUE DES FLUIDES

### Tunnel de l'anneau de stockage

#### Programme SP2.2.1

Date de diffusion	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur	Modifications
Mars 2025	Responsable sous projet SP2.2.1	Responsable pôle projets Responsable bâtiments & infrastructures Responsable groupe achats	Responsable infrastructures et logistiques	Version initiale
Destinataires				

# PUBLIC

*La version électronique fait foi.*

## CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS) – TUNNEL DE L'ANNEAU DE STOCKAGE

### TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
1.1	PRESENTATION DU SYNCHROTRON SOLEIL .....	4
1.2	PRESENTATION DE SOLEIL II .....	5
<b>2</b>	<b>CONTEXTE.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>MISSION.....</b>	<b>5</b>
3.1	L'ENJEU ET LES RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES .....	5
3.2	ETAPE 1 – INTEGRATION DES DONNEES D'ENTREE.....	6
3.3	ETAPE 2 - LANCEMENT DES CALCULS EN DYNAMIQUE .....	8
3.4	ETAPE 3 – FINALISATION DE LA CFD .....	9
<b>4</b>	<b>DETAIL DE L'OFFRE .....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>DELAI DE LA MISSION .....</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>DESCRIPTION DU BATIMENT SYNCHROTRON ET TUNNEL DE L'ANNEAU DE STOCKAGE.....</b>	<b>10</b>
6.1	CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU TUNNEL DE L'ANNEAU DE STOCKAGE.....	13
6.2	EQUIPEMENTS EXISTANTS DANS LE TUNNEL. ....	14
<b>7</b>	<b>PROJET TUNNEL DE L'ANNEAU DE STOCKAGE 2.....</b>	<b>15</b>
7.1	OBJECTIF DU PROJET D'UPGRADE .....	15
7.2	CONTRAINTES POUR LA STABILITE DE TEMPERATURE .....	16
7.3	DONNEES D'ENTREES UPGRADE .....	16
7.3.1	COMPOSITION DE L'ARC .....	19
7.3.1.1	ARC 4 BA.....	20
7.3.1.2	ARC 7 BA.....	20
7.3.2	EVALUATION DES ECHAUFFEMENTS A COURANT 500 MA.....	21
7.3.3	EVALUATION DES PUISSANCES EMISES PAR ARC.....	22
7.3.3.1	ARC 4BA GENERIQUE .....	23
7.3.3.2	ARC 7BA GENERIQUE .....	24
7.3.4	MATERIAUX ET DONNEES D'ENTREES .....	25
7.3.4.1	MATERIAUX ET DONNEES .....	25
7.3.4.2	HYPOTHESE ENVIRONNEMENT DES INFRASTRUCTURES.....	25

## ACRONYMES

Définition des acronymes utilisés dans le présent CCTP :

AFNOR	Association Française de NORmalisation
CCAG	Cahier des Clauses Administratives générales
CCH	Code de la Construction et de l'Habitation
CCTP	Cahier des Clauses Techniques Particulières
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CFA	Courants Faibles
CFO	Courants Forts
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CRT	Cadre de Réponse Technique
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
DCE	Dossier de Consultation des Entreprises
DPGF	Décomposition Prix Global et Forfaitaire
DTU	Document Technique Unifié
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EF	Eau froide
EU	Eaux usées
EV	Eaux vannes
GTC	Gestion Technique Centralisée
HTA	Haute Tension A (anciennement Moyenne Tension)
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
LURE	Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Électromagnétique
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
PSE	Prestation Supplémentaire Éventuelle
REEF	Recueil des éléments utiles à l'Établissement et à l'Exécution des projets et marchés de bâtiments en France
SOLEIL	Source Optimisée de Lumière d'Energie Intermédiaire du LURE
SOLEIL II	Source Optimisée de Lumière d'Energie Intermédiaire du LURE numéro 2.
TGBT	Tableau Général Basse Tension
TGS	Tableau Général de Sécurité
TNS	Terre Neutre Séparés
TOR	Tout Ou Rien
UTE	Union Technique de l'Électricité
VRD	Voirie et Réseaux Divers
Upgrade	Amélioration ou modernisation des installations

# 1 INTRODUCTION



## 1.1 PRESENTATION DU SYNCHROTRON SOLEIL

Situé au cœur du cluster Paris-Saclay, à une vingtaine de kilomètres de Paris, SOLEIL<sup>1</sup> est la source française de rayonnement synchrotron. Dans cette Très Grande Infrastructure de Recherche, les expériences reposent sur l'utilisation d'un rayonnement lumineux produit par des paquets électrons circulant quasiment à la vitesse de la lumière dans un anneau. Ce rayonnement, exceptionnellement brillant, couvre une gamme de longueurs d'onde très large : de l'infrarouge jusqu'aux rayons X, en passant par les ultraviolets. Ses caractéristiques (intensité, focalisation, stabilité...) permettent d'observer la matière à toutes les échelles, jusqu'à celle de l'atome, pour des expériences tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée ou d'intérêt industriel. Depuis 2008, SOLEIL est au service de nombreux domaines qui mobilisent la science et l'industrie aujourd'hui : la physique, la biologie, la chimie, la science des matériaux, l'environnement, les sciences de la Terre ou le patrimoine culturel, notamment. SOLEIL est placé sous la double tutelle du CNRS<sup>2</sup> et du CEA<sup>3</sup>, et offre à son personnel un environnement de travail pluridisciplinaire et international.

---

<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

## 1.2 PRESENTATION DE SOLEIL II

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 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 ont débuté en 2024. Le fonctionnement de l'installation actuelle se poursuivra en parallèle jusqu'à l'automne 2028. Elle sera alors arrêtée pour permettre l'installation des nouveaux équipements. Le démarrage de SOLEIL II est prévu pour 2030, avec une montée en puissance jusqu'en 2035.

Pour plus de détails, site web : <http://www.synchrotron-soleil.fr/>

## 2 CONTEXTE

La modernisation de nos installations impose une refonte totale des accélérateurs de particules de SOLEIL et de l'ensemble de ses composantes.

Dans ce cadre, les physiciens ont défini toutes les caractéristiques techniques des futurs accélérateurs en identifiant les contraintes à intégrer dans les projets d'infrastructures avec notamment les stabilités de température au niveau des futurs systèmes de refroidissement dans l'eau et dans l'air ambiant.

Pour atteindre les objectifs de stabilité de température, SOLEIL doit mandater de l'ingénierie spécialisée dans les calculs STD (Simulation Thermique Dynamique) et CFD (Computational Fluid Dynamics). Ces calculs permettront de caractériser la ou les solutions techniques à déployer aux niveaux des infrastructures et équipements dans le futur anneau de stockage.

## 3 MISSION

### 3.1 L'ENJEU ET LES RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES

La simulation numérique des flux thermiques doit apporter des résultats permettant de proposer à SOLEIL des solutions techniques à déployer au niveau des infrastructures du tunnel de l'anneau de stockage pour atteindre et garantir les niveaux de stabilité thermique ciblés qui seront discutés ci-dessous.

Ces études se dérouleront en 3 étapes permettant ainsi une bonne continuité allant de l'analyse des données d'entrée jusqu'à des simulations de calcul validant l'intégration des solutions infrastructures dans l'environnement des mesures ainsi que les résultats de stabilité thermique qui seront obtenus.

Il est souhaitable pour ces études, que le soumissionnaire présente dans son mémoire technique des références de simulations numériques effectuées dans les domaines de

l'industrie, du nucléaire ou d'expériences sur des systèmes s'approchant des équipements dans le domaine des accélérateurs de particules.

Le soumissionnaire intégrera dans le Cadre de Réponse technique (CRT) les moyens humains et les détails des matériels informatiques (compris les logiciels de calcul) qui serviront pour cette étude.

Avant tout démarrage, une réunion préalable sera tenue en présence du Titulaire et d'un représentant de chaque groupe support de la division accélérateurs et ingénierie de SOLEIL pour la validation des données d'entrée et les objectifs de résultat à atteindre.

Chaque étape de calcul devra être présentée à SOLEIL pour validation permettant ainsi de poursuivre les études suivantes. Un rapport regroupant les calculs de simulation et les résultats, leur analyse et les solutions techniques associées devra être présenté ainsi qu'une synthèse sous forme de présentation sous un format type « PowerPoint » accompagné d'une vidéo de la simulation.

### 3.2 ETAPE 1 – INTEGRATION DES DONNEES D'ENTREE

Le futur anneau de stockage installé dans un tunnel, sera composé de 20 arcs (nomenclaturés de AN01 à AN20) et 20 sections droites répartis de la manière suivante :

- 12 arcs équipés de type 7BA
- 8 arcs équipés de type 4 BA
- 20 sections droites, chacune située entre deux arcs.

Les composantes de chaque arc restent similaires hormis le nombre d'éléments et leurs longueurs.

Les études des sections droites ne font pas l'objet du présent document. Elles pourraient être demandées au cas par cas et feraient l'objet de simulations complémentaires.

Ci-après un extrait de l'arc AN18 avec une partie de section droite :

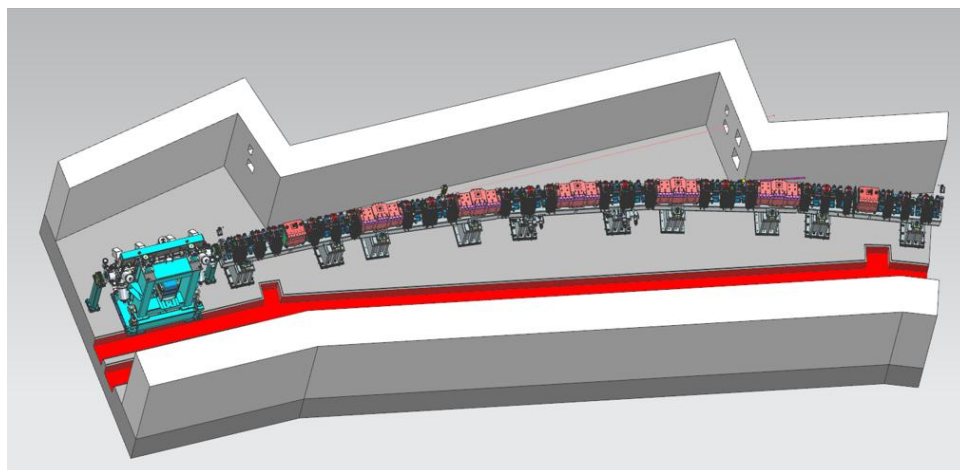


Figure 1 - Extrait de l'arc 18 dans l'environnement du tunnel

Pour cette étude, les deux arcs sélectionnés seront de type 7BA et 4BA, en débutant l'étude sur l'arc de type 7BA (Figure 1). Le document graphique sera extrait de la maquette 3D des études du groupe ingénierie mécanique de SOLEIL au format NX (Siemens) transformé en fichier STEP et PARASOLID. Ces extractions de fichiers étant très chargées en données et représentation graphique, il sera laissé au Titulaire, à partir des analyses des données d'entrée, le soin de retravailler la maquette fournie à son expression volumétrique tout en ciblant les points (décrits ci-après) lui permettant de préparer ses simulations de calcul.

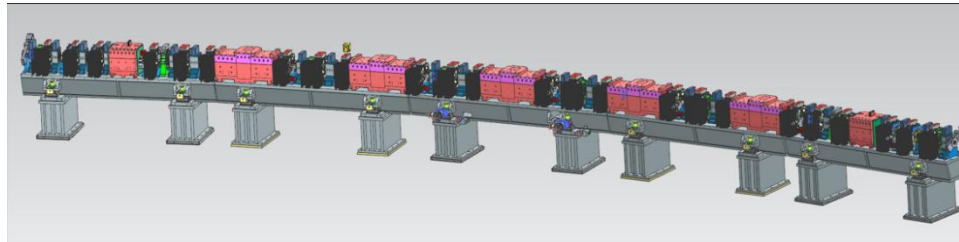


Figure 2 - Extrait d'un arc de type 7BA

La simplification de l'arc devra prendre en compte les éléments d'infrastructures tels que les chemins de câbles et les distributions hydrauliques. Ces infrastructures pourront être représentées sous forme volumétrique d'environ 0,4 m de largeur et 0,80 m de hauteur à partir du sol parallèlement à l'arc. Concernant les distributions des câbles de puissance électrique, le cheminement se fera à l'intérieur des caniveaux en béton dans le sol localisé le long des arcs.

Dans cette étape et à partir des données d'entrée, il est demandé au Titulaire de proposer les modes de transferts thermiques à prendre en compte dans le modèle afin d'obtenir une bonne identification des échanges thermiques entre les éléments de la machine et l'air ambiant du tunnel dans le plan horizontal et le plan vertical (transversal et longitudinal).

Le Titulaire développera les maillages nécessaires au lancement des simulations numériques, un maillage plus fin pourrait être attendu pour appréhender les effets d'échange thermique aux endroits dits sensibles « les BPM (moniteurs de position) et les aimants permanents ».

Cette première étape doit mettre en évidence les échanges thermiques entre les éléments et les matériaux composants la maille de l'arc étudié. Cette simulation doit être lancée avec des vitesses de déplacement des masses d'air nulles à la pression atmosphérique à  $t$  zéro avec une température d'ambiance constante des murs du tunnel (intérieur et extérieur), du sol, et du plafond à 21°C et calculée sous 2 conditions de charges thermiques :

- sans puissance photonique
- avec puissance photonique

Nota : la puissance photonique correspond à la charge thermique induite par le rayonnement synchrotron dans la chambre à vide.

L'objectif de cette étape est de cartographier les températures à l'équilibre sur les différents équipements (« steady state »).

Cette première étape sera présentée à SOLEIL pour validation des résultats et permettre le démarrage de l'étape n°2.

### 3.3 ETAPE 2 - LANCEMENT DES CALCULS EN DYNAMIQUE

Dans cette étape, le Titulaire devra prévoir l'intégration dans le calcul des flux d'échange thermique permettant :

- De maintenir une température ambiante de 21°C sur les équipements critiques (ci-dessous).
- D'obtenir un gradient de température longitudinal inférieur à 0.2°C sur les 7 dipôles et les 8 quadripôles permanents d'un arc 7BA (voir schéma)
- D'obtenir une stabilité de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  sur les BPM d'extrémité des arcs et le BPM (entrée/sortie) du dipôle central de la cellule (voir schéma)
- De minimiser les températures de surface des faces avant et arrière des aimants et des poutres

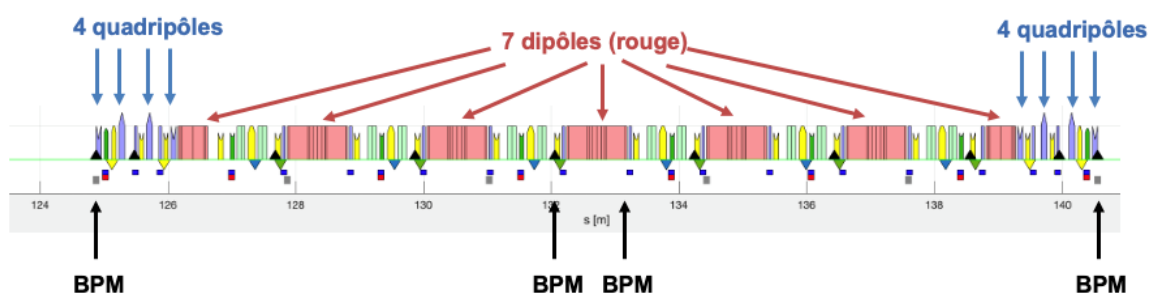


Figure 3 - Synoptique d'un arc

Ces calculs devront être effectués :

- Méthode avec déplacement d'air, le Titulaire sélectionnera les paramètres de vitesse, pression et température de l'air.
- Méthode sans déplacement d'air « dite statique » pour exemple de traitement par paroi froide (effet convectif).
- Appréciation des effets vibratoires induits par le déplacement d'air (FSI - FLUID SOLID INTERACTION).
- Pour chaque méthode étudiée, des résultats de performances devront être présentés avec notamment :
  - Durée d'établissement de la température du tunnel avec les accélérateurs à l'arrêt.
  - Durée de stabilisation après une interruption du faisceau de 20 mn (retour de la puissance photonique – cf. voir ci-après).
  - Présentation des résultats sur les gradients obtenus en longitudinal et en transverse.

Aux résultats de cette étape, le Titulaire présentera un rapport à SOLEIL en indiquant en conclusion, la préconisation de la méthode de traitement à déployer pour atteindre les objectifs présentés au début de l'étape n°2.

### 3.4 ETAPE 3 – FINALISATION DE LA CFD

A partir des résultats et de la méthode la plus efficace pour garantir la stabilité de température dans le tunnel de l'anneau de stockage et des composants des accélérateurs, SOLEIL proposera des moyens techniques issues de technologies éprouvées dans l'industrie pour le traitement thermique du tunnel en adéquation avec les résultats de la simulation de l'étape n°2. Il sera demandé au Titulaire de refaire une simulation de calcul intégrant les contraintes de la solution de traitement thermique retenue avec les caractéristiques techniques des équipements identifiés.

Cette dernière étape sera présentée à SOLEIL pour confirmation des résultats et permettre ainsi de lancer les études d'infrastructures en interne à SOLEIL.

Une étude plus conséquente pourrait être demandée pour étendre la simulation sur un ensemble de 2 arcs (voir plus) 7BA et 4BA intégrant les sections droites avec d'autres équipements spécifiques avec différentes configurations d'équipements (configuration injection, onduleur ou système radio fréquence). Cette prestation devra être chiffrée dans le BPU en pièce jointe.

## 4 DETAIL DE L'OFFRE

Le soumissionnaire présentera dans son offre le coût associé pour chaque étape.

La mission de base sera chiffrée et présentée selon la trame de la DPGF (décomposition du prix global et forfaitaire) fournie. Une seconde trame BPU (bordereau des prix unitaires) doit être renseignée par relance de calcul suivant les étapes et la durée associée.

Note : Il sera demandé au soumissionnaire de répondre à la DPGF et au BPU du dossier, la trame principale devra être respectée.

## 5 DELAI DE LA MISSION

Ci-dessous un modèle d'évaluation en semaine de planning :

Désignation	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Validation des données													
Etape 1													
Validation Etape 1													
Etape 2													
Validation Etape 2													
Etape 3													
Validation Etape 3													

Il est demandé au soumissionnaire de présenter 2 plannings détaillés

1. Sur la base des différentes étapes décrites au CCTP
2. Sur les durées des relances complémentaires par étape

En complément, le soumissionnaire présentera dans le CRT le détail des ressources qui seront engagées ce projet.

## 6 DESCRIPTION DU BATIMENT SYNCHROTRON ET TUNNEL DE L'ANNEAU DE STOCKAGE

Le tunnel de l'anneau de stockage est localisé dans le bâtiment synchrotron qui sera thermalisé à  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  24 heures sur 24 toute l'année.

Ce bâtiment a été construit selon les critères de réglementation thermique de la RT2005, il se décompose en 3 parties :

- Partie 1 : Sur le périmètre extérieur, au rez-de-chaussée sous l'appellation « oreilles », des laboratoires et ateliers de préparation et à l'étage des bureaux et des salles de réunion. L'ensemble est maintenu en température par des systèmes de climatisation.
- Partie 2 : Le Hall expérimental, de grande hauteur environ 17 mètres sous plafond, regroupe les zones de circulation intérieures et extérieures, les surfaces dédiées aux lignes de lumière, le tunnel de l'anneau de stockage et la galerie intérieure dédiée essentiellement aux différentes baies de puissance et de contrôle des éléments de l'anneau de stockage.
- Partie 3 : Désignée sous l'appellation « zone cœur », elle regroupe 2 autres tunnels des accélérateurs (booster et LINAC), des locaux électriques, des locaux dédiés aux différents groupes supports ainsi qu'à l'étage des bureaux, salle de commande et de réunion.

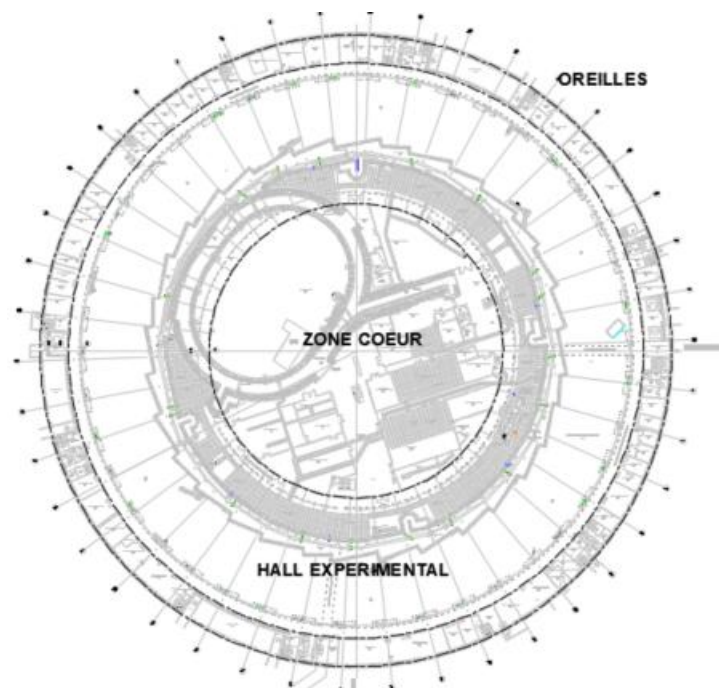


Figure 4 - Extrait plan synchrotron niveau rez-de-chaussée

La partie extérieure du tunnel de l'anneau de stockage donne sur le hall expérimental dont le maintien de la température ciblée est assuré par un ensemble de centrale de traitement d'air (au total 120 unités) réparties sur les périmètres extérieurs et intérieurs du hall.



Figure 5 - Vue depuis la passerelle le hall expérimental

Légende :

1. Toit du tunnel de l'anneau de stockage
2. Lignes de lumière
3. Centrales de traitement du hall d'air côté extérieur
4. Centrales de traitement du hall côté intérieur

### **Le tunnel de l'anneau de stockage**

Le tunnel est posé sur une dalle béton, des parois verticales en béton dont les épaisseurs et le traitement garantissent la protection contre le rayonnement. La partie toiture, en béton, a la particularité de s'ouvrir pour les accès en maintenance et en exploitation.

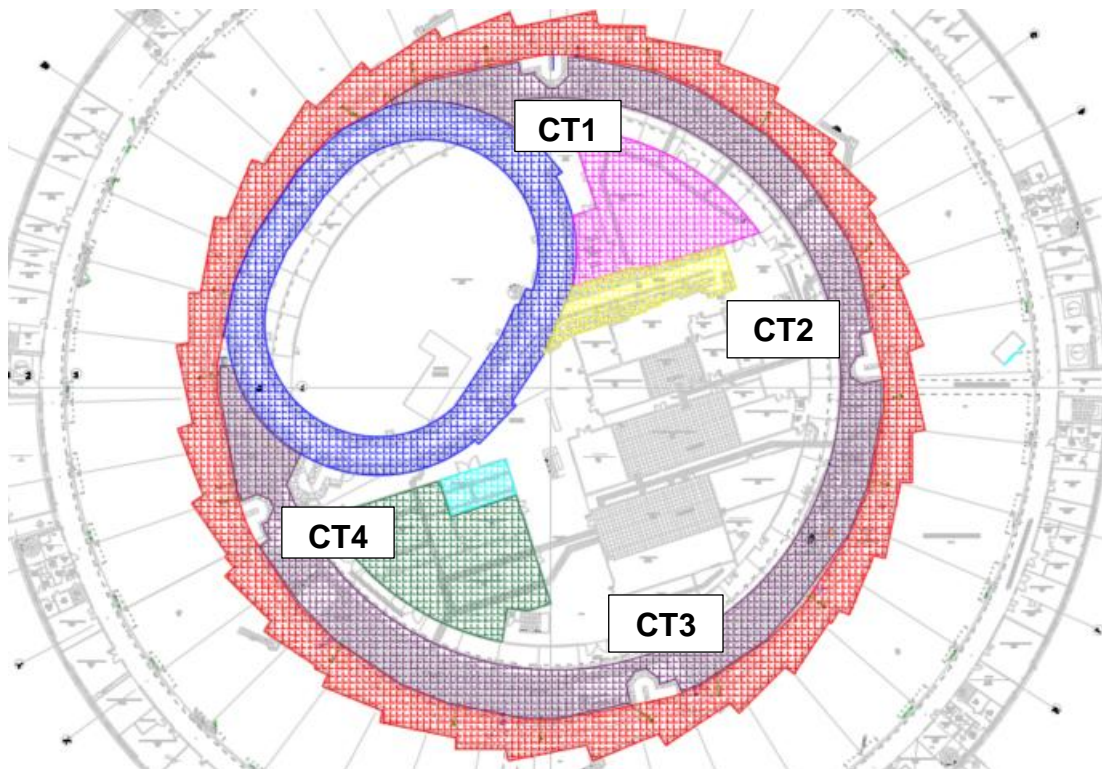


Figure 6 - Extrait du plan de repérage - en rouge le tunnel de l'anneau de stockage

Le tunnel de l'anneau de stockage possède 4 zones d'accès (repère CT) avec une porte sous contrôle d'accès. Le sas d'accès à la forme d'une chicane pour éviter tout risque de fuite du rayonnement.

Ces accès sont généralement utilisés :

- Lors des arrêts techniques, une maintenance, les portes sont généralement ouvertes (durée longue).
- Lors d'une perte faisceau, il faut parfois rentrer sous contrôle d'accès en limitant le périmètre d'activité et la durée d'intervention. Cette période est l'un des points qu'il faudra identifier pour l'évaluation du temps de stabilisation de la zone perturbée.

En plus des actions de maintenance standard lors des arrêts techniques, il est parfois demandé l'ouverture d'une partie de la toiture pour les accès et manutention des éléments avec les ponts roulants.

La toiture est donc fermée par l'intermédiaire de dalots en béton juxtaposés les uns contre les autres et sur 2 nappes posées en quinconce pour éviter des fuites de rayonnement. Ces dalots sont numérotés et placés dans un ordre bien précis.

Ce montage imbriqué n'est pas étanche à l'air.

A noter que lors de l'ouverture des dalots, la thermalisation du tunnel n'est plus garantie.



*Figure 7 - Ouverture d'une partie du toit du tunnel*

A noter que les zones d'accès sont utilisées pour le désenfumage (voir figure 4 en page 13) :

- 2 sas d'accès pour les amenées d'air (repères CT2 et CT4).
- 2 sas d'accès pour l'extraction d'air (repères CT1 et CT3).

## 6.1 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU TUNNEL DE L'ANNEAU DE STOCKAGE

Données du dossier des ouvrages exécutés (DOE) de construction :

ELEMENTS	DIMENSIONS (m)	MATERIAU / CONDUCTIVITE (W/m.K)	TEMPERATURE/ PUISSANCE/ RESISTANCE THERMIQUE (m <sup>2</sup> .K/W)	EMISSIVITE
Sol	ép. = 0,80	béton/ 1,63	Température fixée à 23°C sous le dallage	0,63
Plafond	ép. = 1	béton/ 1,63	Thall fixée à 23°C et h = 10 sur les parois externes	0,63
Murs	haut. int. = 2,20 Øint = 52,50 Øext = 59,80 ép. int. = 0,90 ép. ext. = 0,70	béton/ 1,63	Thall fixée à 23°C et h = 10 sur les parois externes	0,63
Luminaires	<p>Tubes collés au plafond (1,5*0,20*0,20); 72W chacun dissipés dans l'air 2 tubes tous les 2,57°</p> <p>Mail P. Goy 2021 : « il y a 228 appareils d'éclairage dans le tunnel anneau. Les 2x36w fluos ont été remplacés par 1x40w LED 4000k. »</p>			

Figure 8 - Tableau des données pour la structure du tunnel - Utilisés pour la CFD de 2004

Les valeurs indiquées dans le tableau pour l'éclairage ne sont plus d'actualité. On considèrera dans l'étude que l'éclairage est coupé durant le fonctionnement des accélérateurs.

Dimensions périmétriques du tunnel :

- Intérieur côté zone cœur, environ 338 mètres (diamètre de 108 mètres)
- Intérieur côté hall expérimental, environ 363 mètres (diamètre de 115 mètres)

A noter que pour la partie côté hall expérimental, l'arc se termine par un mur de redan perpendiculaire à l'axe du faisceau. Ces redans sont utilisés pour le passage de la lumière synchrotron vers les lignes de lumière.



Figure 9 - Extrait du plan Architecte - sas d'entrée dans le tunnel et mur de redan

### Légende du périmètre d'un sas d'entrée du tunnel

- Porte d'accès au tunnel (avec contrôle d'accès) ●
- Sas de protection ●
- Tunnel anneau de stockage ●
- Mur extérieur du tunnel en contact avec le hall du bâtiment synchrotron ●
- Mur de redan pour la sortie du faisceau de lumières pour les laboratoires ●
- Caniveaux de sol pour le passage des câbles de puissance ●

## 6.2 EQUIPEMENTS EXISTANTS DANS LE TUNNEL.

Pour référence, aujourd'hui, le tunnel de l'anneau de stockage est maintenu en température à  $21^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$  au moyen de 140 unités de rafraîchissement (UTA) réparties sur les 16 cellules de l'accélérateur.

Dans le tunnel de l'anneau de stockage, nous avons :

- Les éléments composants l'accélérateur de particules posés sur marbre et châssis.
- Les éléments machine composant la tête de ligne pour chaque ligne de lumière.
- Des éléments spécifiques, onduleurs et cavités RF.
- Les distributions hydrauliques pour le refroidissement (non isolées).
- Les dalles pour le passage des câbles électriques de commande / contrôle.
- Les caniveaux permettant le passage des câbles électriques de puissance pour les électro-aimants.
- Les distributions d'eau glacée pour les unités de rafraîchissement (UTA).
- Les unités de rafraîchissement (UTA).
- Les éclairages et divers coffrets électriques pour la maintenance.

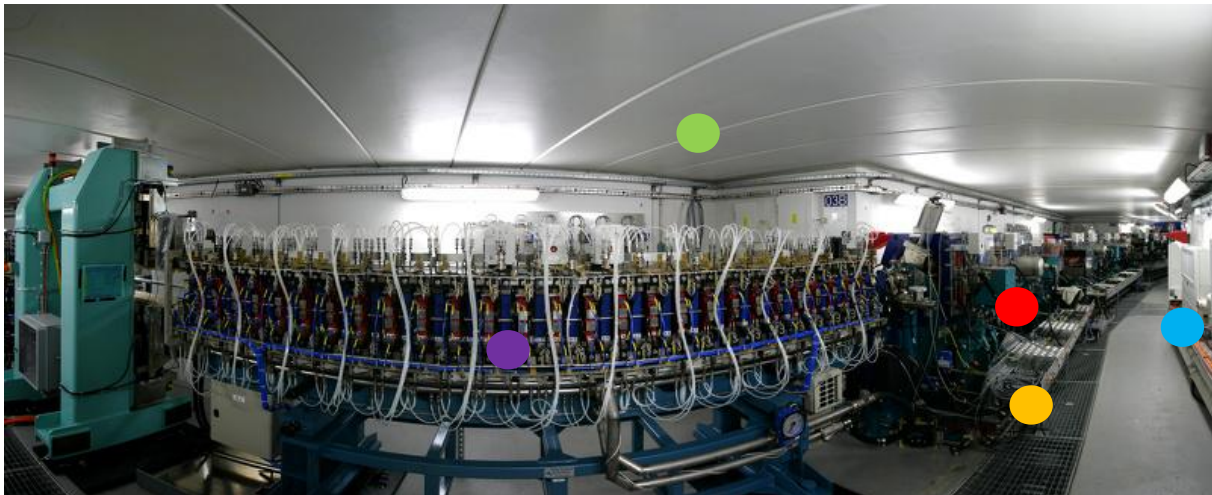





Figure 10 - Photo du HU256

### Légende des éléments de la photo

- ● Toit démontable par ouverture des dalots (aucun équipement technique ne doit être supporté et entraver la surface d'ouverture).
- ● Arc composé d'un ensemble d'éléments (chambres à vide, électro-aimants, etc.).

-  Élément spécifique pour exemple le HU256.
-  Les infrastructures : chemins de câbles, les caniveaux, les tubes de refroidissement.
-  Les unités de rafraîchissement (UTA).

## 7 PROJET TUNNEL DE L'ANNEAU DE STOCKAGE 2

Pour le projet d'upgrade du tunnel de l'anneau de stockage, tous les équipements existants précédemment décrits seront déposés et enlevés. Dans la mesure du possible, les points d'entrées physiques des infrastructures seront conservés tels que :

- Les pénétrations d'eau du circuit de refroidissement.
- Les pénétrations d'eau du circuit eau glacée.
- Les passages pour l'accès aux caniveaux.
- Les ventilations du désenfumage.

### 7.1 OBJECTIF DU PROJET D'UPGRADE

Pour garantir le maximum de stabilité thermique, SOLEIL envisage pour l'upgrade de limiter au maximum le nombre de régime de température. La température de référence sera de 21°C. Cette température devra être maintenue dans :

- Le hall du bâtiment synchrotron.
- Le tunnel de l'anneau de stockage.
- L'eau de refroidissement en entrée des équipements.

Concernant le tunnel de l'anneau de stockage, le gradient maximal de température sur la longueur de la poutre (environ 3 mètres) de l'arc ne doit pas dépasser  $\pm 0.1$  °C et si possible 0,05 °C.

Le temps d'établissement de la stabilité de température dans le tunnel ciblé sera :

- 1 heure après un redémarrage des équipements
- 20 minutes après une interruption faisceau machine ou dit autrement entre l'absence et le retour de la puissance photonique.

Rappel des temps de fonctionnement sur une année :

- Fonctionnement 24/7 jours.
- Temps faisceau annuel de 6 300 heures répartis :
  - 5000 heures avec charges thermiques constantes (faisceau utilisateurs).
  - 1300 heures avec charges thermiques évolutives (faisceau étude accélérateurs).
- Le reste du temps lors des arrêts techniques pour des tests sur équipements sans faisceau.

## 7.2 CONTRAINTES POUR LA STABILITE DE TEMPERATURE

Les technologies qui seront déployées pour cette upgrade imposent des contraintes fortes :

- Réduire le gradient longitudinal de la température de surface à 0.2°C entre aimants dipôles et quadrupôles.
- Réduire les gradients de température transverse entre les faces intérieures et extérieures des aimants, des poutres et des BPMs.
- Minimiser les variations de température dans le tunnel quel que soit le courant injecté :
  - Bas courant 15 mA (équivalent à pas de puissance photonique)
  - Fort courant à 500 mA (puissance photonique)

*Tableau 1: Puissance photonique pour les deux types d'arc considérés. Sans faisceau d'électrons, les électroaimants restent énergisés, mais la puissance photonique collectée émise dans l'air par les chambres à vide est absente.*

Configuration	Puissance photonique	Équipements
Arc 4BA	244 W	Chambres à vide
Arc 7BA	447 W	Chambres à vide

Nota : les BPM et les XBPM sont la référence pour garantir la stabilité du faisceau et maintenir les performances de l'anneau de stockage.

## 7.3 DONNEES D'ENTREES UPGRADE

Toutes les données qui vont suivre sont issues du travail effectué par les différents groupes internes à SOLEIL sur la recherche et développement. Les arcs de référence pour les données d'entrée sont l'arc AN07 (arc court 4BA) et l'arc AN08 (arc long 7BA).

Pour la compréhension des données, plusieurs types de représentation seront intégrés dans le présent document sous forme de synoptique, extrait de vues en deux dimensions ou en trois dimensions.

Un tableau récapitulatif des données sera intégré dans le présent document, ces données devront être confirmées par SOLEIL avant le lancement des simulations.

Des fichiers graphiques type STEP et PARASOLID seront fournis pour l'intégration dans le logiciel de calcul. Ces fichiers intégreront :

- Les éléments de l'arc traité
- L'enveloppe du tunnel
- Les éléments d'infrastructures comme, l'éclairage, les chemins de câbles et les distributions des fluides de refroidissement.

Exemple pour la symbolisation des arcs 4BA et 7BA

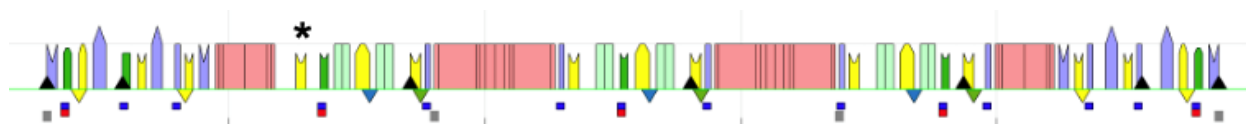


Figure 11 - Extrait de la symbolisation d'un arc 4BA

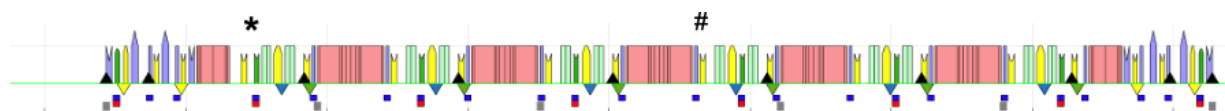








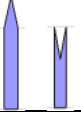





Figure 12 - Extrait de la symbolisation d'un arc 7BA

Symbole	Description	Symbole	Description
	Correcteurs dipolaires horizontal et vertical		Correcteur quadripolaire droit
	Correcteur dipolaire horizontal		Correcteur quadripolaire tourné
	Correcteur dipolaire vertical		
*	Spécial correcteur dipolaire horizontal		BPM
#	Spécial correcteur dipolaire horizontal et vertical		
	Dipôle en aimants permanents		Dipôle inversé en aimants permanents (« reverse bend »)
	Quadrupôle en aimants permanents		Sextupôle électromagnétique
	Octupôle électromagnétique		Correcteur quadripolaire isolé

Les codes couleur utilisés dans les synoptiques seront réutilisés pour l'ensemble des documents avec pour légende :

- En rose pâle, les éléments magnétiques permanents de type « Dipôle »
- En vert pâle, les éléments magnétiques permanents de type « Reverse Bend »
- En bleu pâle, les éléments magnétiques permanents de type « Quadrupôle ». Seuls les correcteurs fins quadripolaires sont refroidis à l'eau.
- En jaune, les « Sextupôles » électro-aimants sont refroidis à l'eau
- En vert foncé, les correcteurs des « Octupôles » électromagnétiques sont refroidis à l'eau

N'apparaît pas dans ces synoptiques, la chambre à vide au travers de laquelle passe le faisceau d'électrons (puissance photonique). Cette chambre est linéaire sur la totalité de l'arc et passe dans l'axe de l'ensemble de ses éléments. L'axe faisceau est à 1,20 mètre du sol.

Représentation globale du tunnel de l'anneau de stockage avec les 20 cellules.

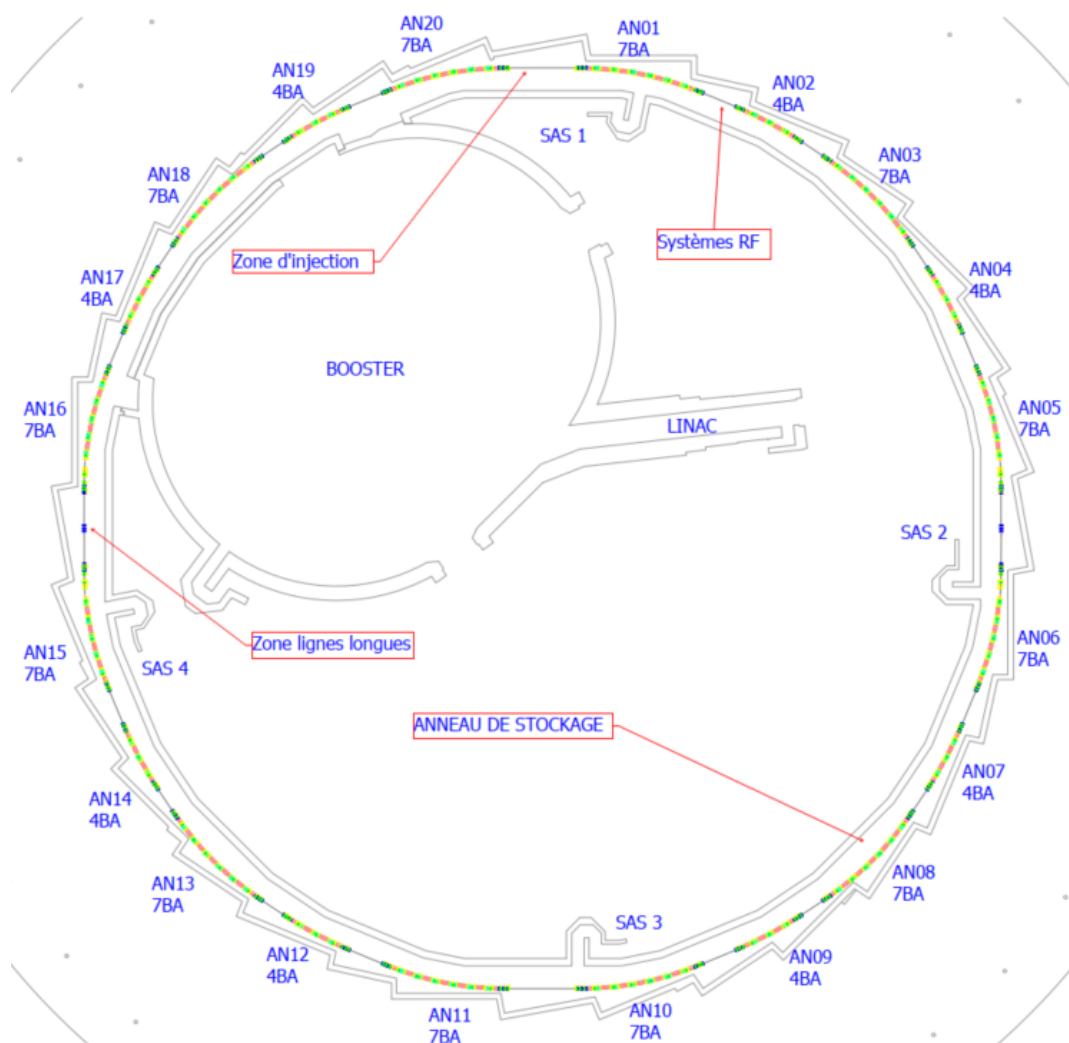


Figure 13 - Extrait version simplifiée pour l'implantation des cellules

### 7.3.1 COMPOSITION DE L'ARC

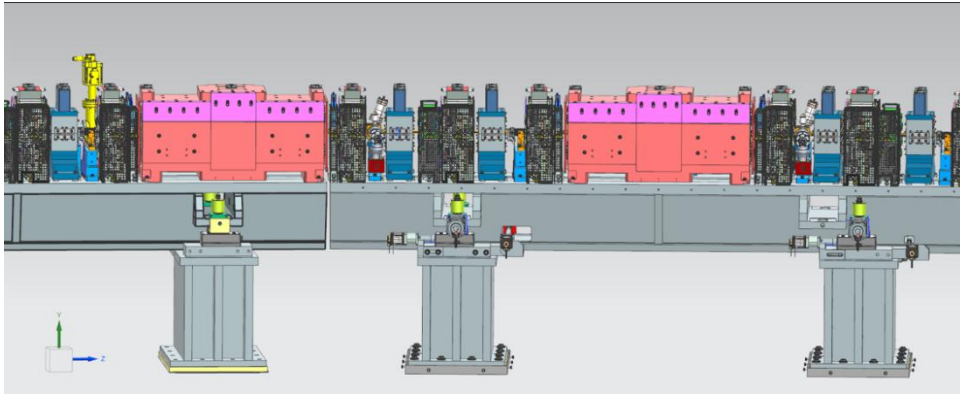


Figure 14 - Extrait d'une vue d'une partie de l'arc du bureau R&D SOLEIL

Tous les éléments de la maille sont posés sur un châssis « poutre » métallique reposant lui-même sur plusieurs socles métalliques.

Sur l'axe des éléments de la maille prend place une chambre à vide dans laquelle circule faisceau d'électrons (producteur de la charge photonique) dans des conditions d'ultra-vide. Voir ci-dessous un agrandissement d'une petite partie :

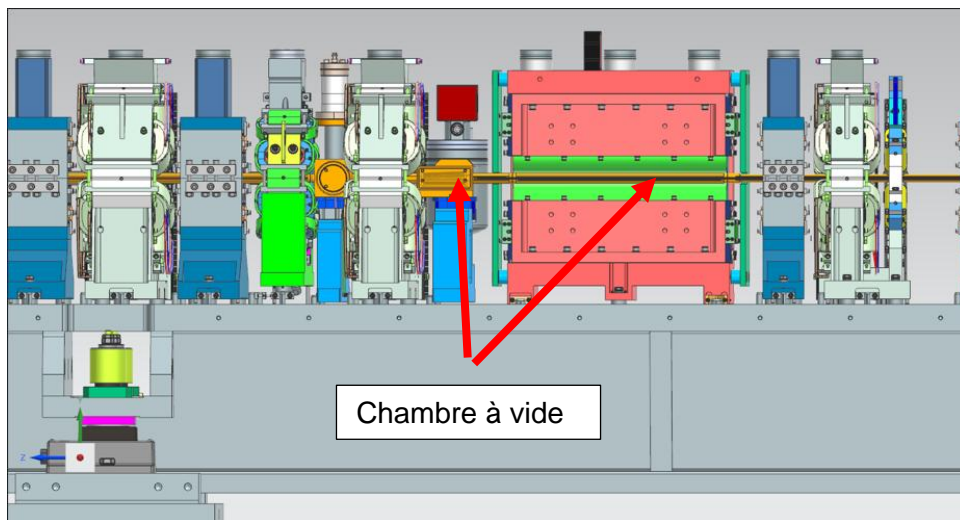


Figure 15 - Focus sur la position de la chambre à vide (photons)

## 7.3.1.1 ARC 4 BA

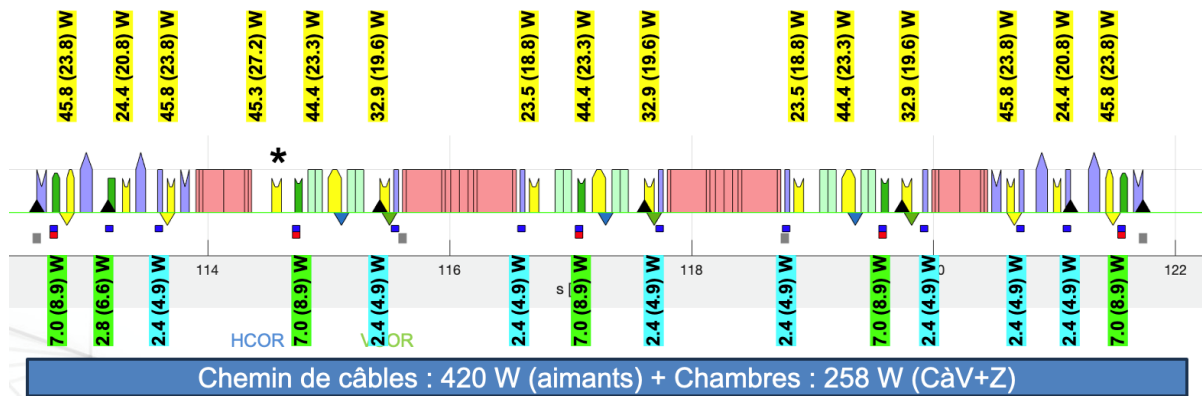


Figure 16 – Extrait de la maille 4BA

## Description d'un ARC :

- Aimants
  - 1 chambre à vide sur la longueur de l'arc (non représentée). Pour simplifier, les puissances déposées sont concentrées sur les absorbeurs photons.
  - 3 châssis poutre sur socles métalliques (en gris, P1, P2 et P3)
  - 4 dipôles permanents
  - 6 dipôles inversés permanents
  - 8 quadripôles
  - 15 sextupôles
  - 6 octupôles
  - 7 BPMs
  - 34 Correcteurs :
    - 8 correcteurs dipolaires CDLH
    - 7 correcteurs dipolaires CDLV
    - 14 correcteurs quadripolaires CQLN dont correcteurs 8 isolés.
    - 5 correcteurs quadripolaire CQLT
- Des chemins de câbles

## 7.3.1.2 ARC 7 BA

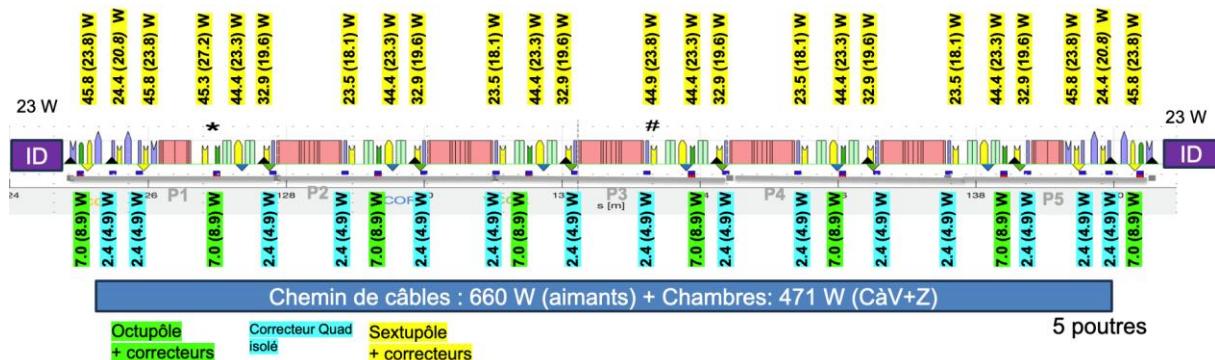


Figure 17 - Extrait de la maille 7BA

- 1 chambre à vide sur la longueur de la cellule (non représentée). Pour simplifier, les puissances déposées sont concentrées sur les absorbeurs photons.
- 3 châssis poutre sur socles métalliques (en gris, P1 à P5)
- 7 dipôles permanents
- 12 dipôles inversés permanents
- 8 quadripôles
- 24 sextupôles (Sextupôle)
- 8 octupôles (Octupôle)
- 10 BPMs
- 54 correcteurs :
  - 12 correcteurs dipolaire CDLH
  - 11 correcteurs dipolaire CDLV
  - 23 correcteurs quadripolaires CQLN dont 15 correcteurs isolés
  - 8 correcteurs quadripolaires CQLT

### 7.3.2 EVALUATION DES ECHAUFFEMENTS A COURANT 500 MA

En fonctionnement nominale, un faisceau de 500 mA circule dans l'accélérateur ; une puissance est déposée sur les chambres à vide de l'anneau et des têtes de ligne :

- le faisceau d'électrons dépose la puissance (impédance)
- les faisceaux de photons déposent de la puissance photonique.

Pour simplifier la simulation, la puissance déposée (258 W pour un 4BA et 471 W pour une 7BA) est concentrée sur les absorbeurs des photons en aval des dipôles principaux. A ces puissances, il faut ajouter la puissance dans la tête de ligne non représentée sur les schémas

- 50 W tête de ligne ouverte
- XXXX tête de ligne fermée (moyenne)

Nota : les puissances photoniques issue d'un dipôle long ou court sont similaires. Les puissances issues des dipôles inversés sont négligées.

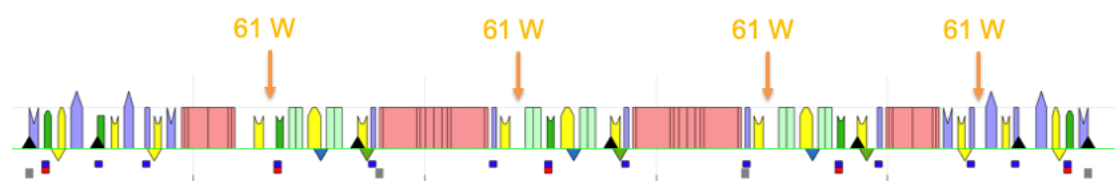


Figure 18 – Puissance liée à la présence du faisceau (photons et impédance) pour un arc 4BA

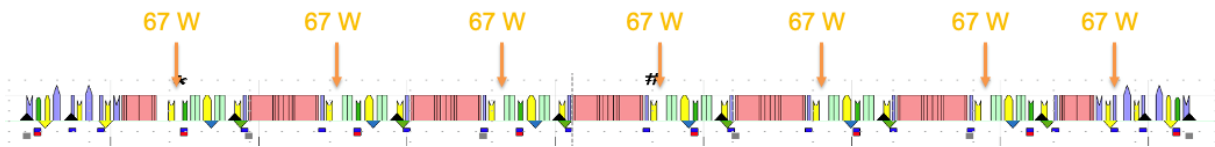


Figure 19 Puissance liée à la présence du faisceau (photons et impédance) pour un arc 7BA

### 7.3.3 EVALUATION DES PUISSANCES EMISES PAR ARC

Un rappel de l'environnement proche des différents arcs :

- Le tunnel de l'anneau de stockage avec sa partie haute amovible.
- Le mur de fond avec le redan pour la sortie faisceau ligne de lumière.
- Les sections des arcs 4BA et 7BA.
- Les sections droites (SD) intégrées aux arcs.
- La tête de ligne spécifique à chaque ligne de lumière.
- Les servitudes, câbles de puissance et réseau fluide de refroidissement.
- Les éclairages.

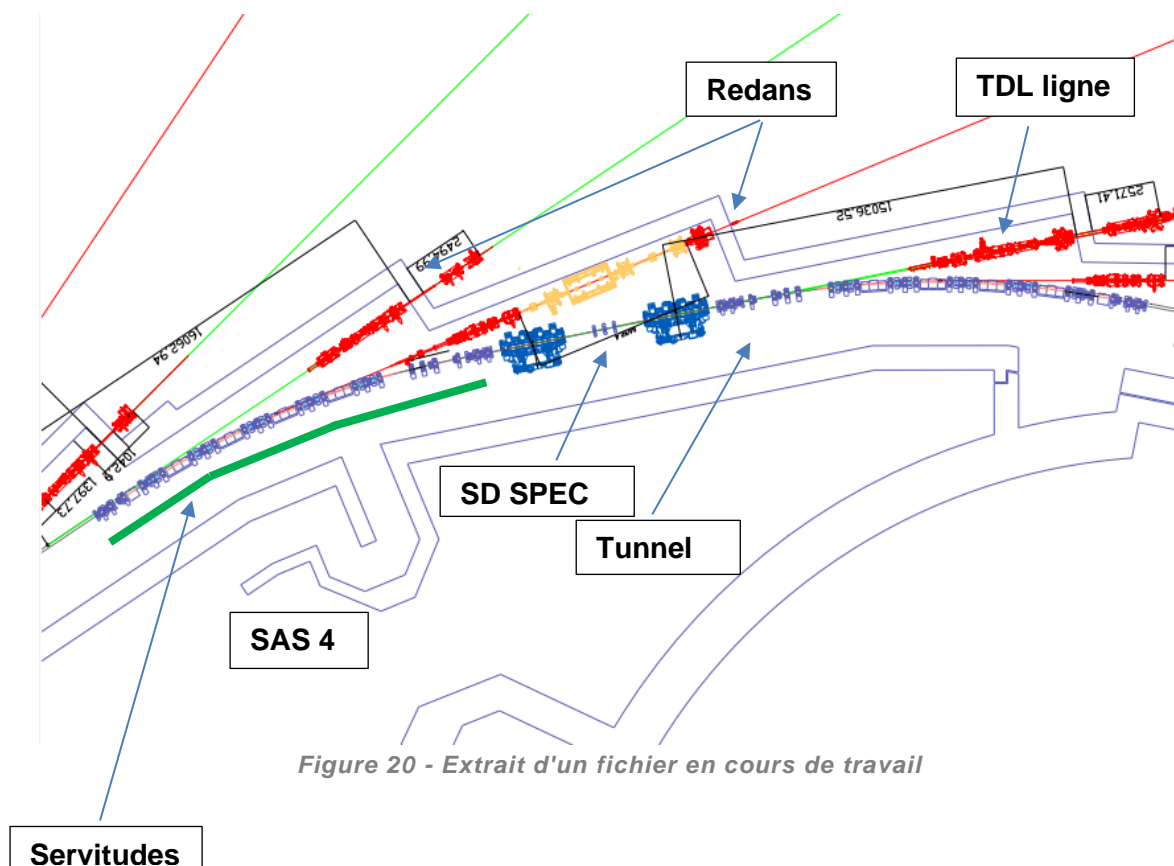
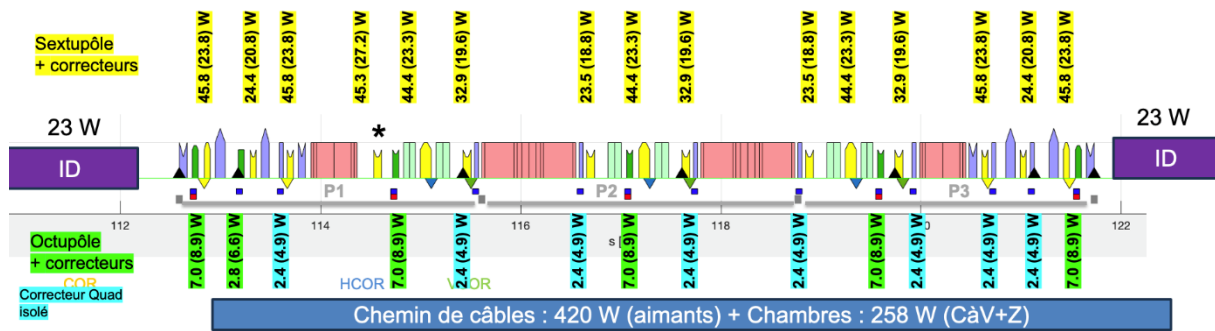


Figure 20 - Extrait d'un fichier en cours de travail

## 7.3.3.1 ARC 4BA GÉNÉRIQUE



Le tableau suivant donne les évaluations des puissances dissipées de la cellule dans l'air. Les 460 W des LED de l'éclairage sont négligés, car l'éclairage est éteint durant le fonctionnement.

Il reste une puissance de

- 613 W par les aimants et 46 W pour les onduleurs,
- 420 W dans les câbles (en bleu dans le tableau).
- 308 W de puissance lié au faisceau (en jaune dans le tableau, soit 22% de la puissance totale)

Équipement	P. cellule [W]
Sextupôles (en jaune)	394
Câblages sextupôles	307
Octupôles (en vert)	11
Câblage octupôles	9
Correcteurs (moyenne)	208
Câblages Correcteurs	104
Chambre à vide	244
Impédance	14
Tête de ligne de lumière	50
Onduleurs (ID)	46
Total arc 4BA	1387

Ces hypothèses de puissance sont données pour une hypothèse pessimiste de courant des octupôles et des correcteurs, en considérant 50% de leur valeur maximale respective.

Nota : Les puissances émises sur la tuyauterie retour du circuit de refroidissement restent très faibles et ne seront pas comptabilisées dans le bilan de puissance.

## 7.3.3.2 ARC 7BA GÉNÉRIQUE

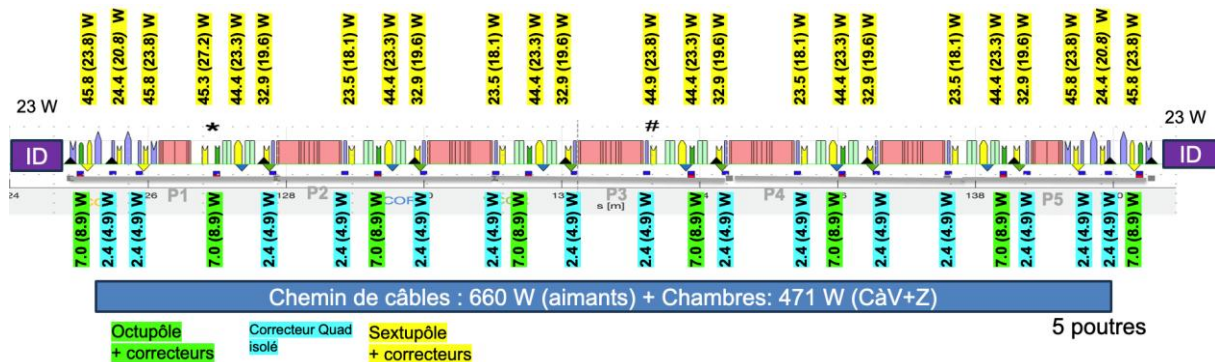


Figure 22 - Extrait slide évaluation des puissances dissipées

Le tableau suivant donne les évaluations des puissances dissipées de la cellule dans l'air. Les 460 W des LED de l'éclairage sont négligés, car l'éclairage est éteint durant le fonctionnement. Il reste une puissance de

- 1011 W par les aimants et 46 W pour les onduleurs,
- 660 W dans les câbles (en bleu dans le tableau).
- 521 W de puissance photonique (en jaune dans le tableau, 23% de la puissance totale)

Equipement	P. cellule [W]
Sextupôles (en jaune)	672
Câblages sextupôles	481
Octupôles (en vert)	14
Câblage octupôles	12
Correcteurs (moyenne)	325
Câblages Correcteurs	167
Chambre à vide	447
Impédance	24
Tête de ligne de lumière	50
Onduleurs (ID)	46
Total arc 7BA	2238

Ces hypothèses de puissance sont données pour une hypothèse pessimiste de courant des octupôles et des correcteurs, en considérant 50% de leur valeur maximale respective.

Nota : Les puissances émises sur la tuyauterie retour du circuit de refroidissement restent très faibles et ne seront pas comptabilisées dans le bilan de puissance.

### 7.3.4 MATERIAUX ET DONNEES D'ENTREES

#### 7.3.4.1 MATERIAUX ET DONNEES

Désignation	Type	Matériau	Température surface	Température eau	Delta de temp. eau
			[°C]	[°C]	[°C]
Poutres	Support	Acier			
Sextupôles	Electro aimant	Cuivre / Acier		23	
Octupôles	Electro aimant	Cuivre / Acier		23	
Dipôles (Bend]	Aimant permanent	Acier / Aimant permanent			
Dipôles inversés [reverse Bend)	Aimant permanent	Acier / Alu / Aimant permanent			
Quadrupôles	Aimant permanent	Acier / Alu / Aimant permanent			
BPM		Inox 316L			
Chambre à vide		Cuivre Cr Zr		23	
Correcteurs		Acier / Cuivre			

#### 7.3.4.2 HYPOTHESE ENVIRONNEMENT DES INFRASTRUCTURES

Les présentations qui suivent sont des hypothèses d'implantation des infrastructures à mettre en place pour les distributions hydrauliques et les distributions électriques.

Pour la compréhension de l'environnement en exploitation et pour la CFD, l'ensemble des infrastructures seront pour les connexions en eau et en câbles électriques du côté intérieur (zone de circulation) avec pour objectif de ne pas dépasser la hauteur de la poutre machine.

