

09/10/2025 - Journées  
Accélérateurs 2025 de la SFP

# SOLEIL II : Début de l'Étape de Construction

Alexandre MOUTARDIER pour Alexis GAMELIN pour l'équipe de construction de SOLEIL II

Contact / coordinateur Prog. Construction des Accélérateurs  
[laurent.nadolski@synchrotron-soleil.fr](mailto:laurent.nadolski@synchrotron-soleil.fr)

- Introduction
- SOLEIL II en quelques mots
- Organisation
- Début de la phase de construction de SOLEIL II
- Première réalisations et prototypes
- Conclusion





**SOLEIL** est la **source de rayonnement synchrotron nationale française** mise en service en 2006.

Il s'agit d'un accélérateur de particules à grande échelle qui fournit du **rayonnement synchrotron** pour de vastes domaines de la recherche scientifique.

- matériaux avancés
- énergies renouvelables
- sciences de la santé
- sciences de l'environnement

Avec **29 lignes de lumière**, SOLEIL peut fournir un rayonnement synchrotron allant du **THz aux rayons X durs**, avec une spécialisation dans la gamme des **rayons X mous**.

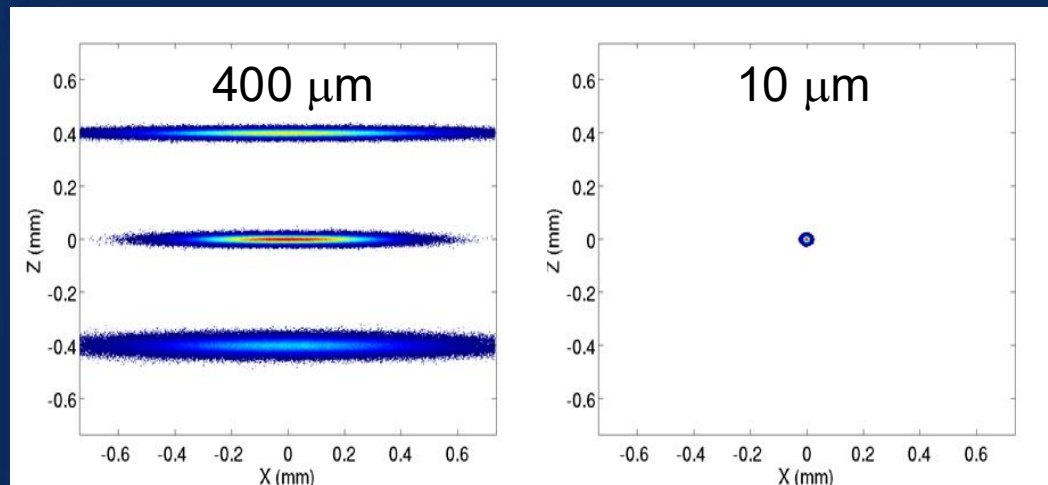


- 
- Faisceaux disponibles  
■ MTBF
- | Année | Faisceaux disponibles (%) | MTBF (h) |
|-------|---------------------------|----------|
| 2007  | 93,83%                    | 21h 50   |
| 2008  | 95,70%                    | 32h 00   |
| 2009  | 96,39%                    | 34h 30   |
| 2010  | 96,27%                    | 41h 10   |
| 2011  | 98,42%                    | 47h 00   |
| 2012  | 96,11%                    | 49h 30   |
| 2013  | 98,00%                    | 67h 50   |
| 2014  | 98,50%                    | 75h 10   |
| 2015  | 98,89%                    | 105h 30  |
| 2016  | 93,24%                    | 80h 00   |
| 2017  | 98,70%                    | 92h 40   |
| 2018  | 98,85%                    | 88h 00   |
| 2019  | 98,86%                    | 95h 53   |
| 2020  | 98,79%                    | 105h 00  |
| 2021  | 98,41%                    | 109h 00  |
| 2022  | 98,95%                    | 139h 30  |
| 2023  | 97,32%                    | 146h 20  |
| 2024  | 98,77%                    | 97h 50   |

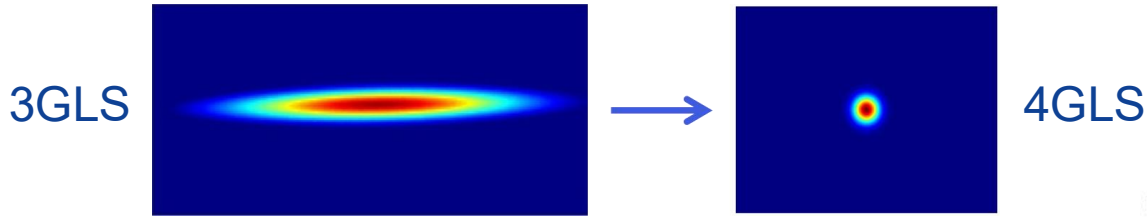
# SOLEIL II en Quelques mots

3ème génération

4ème génération



**SOLEIL**  **SOLEIL II**  
 $\epsilon = 3.9 \text{ nm.rad}$   $\epsilon = 90 \text{ pm.rad}$

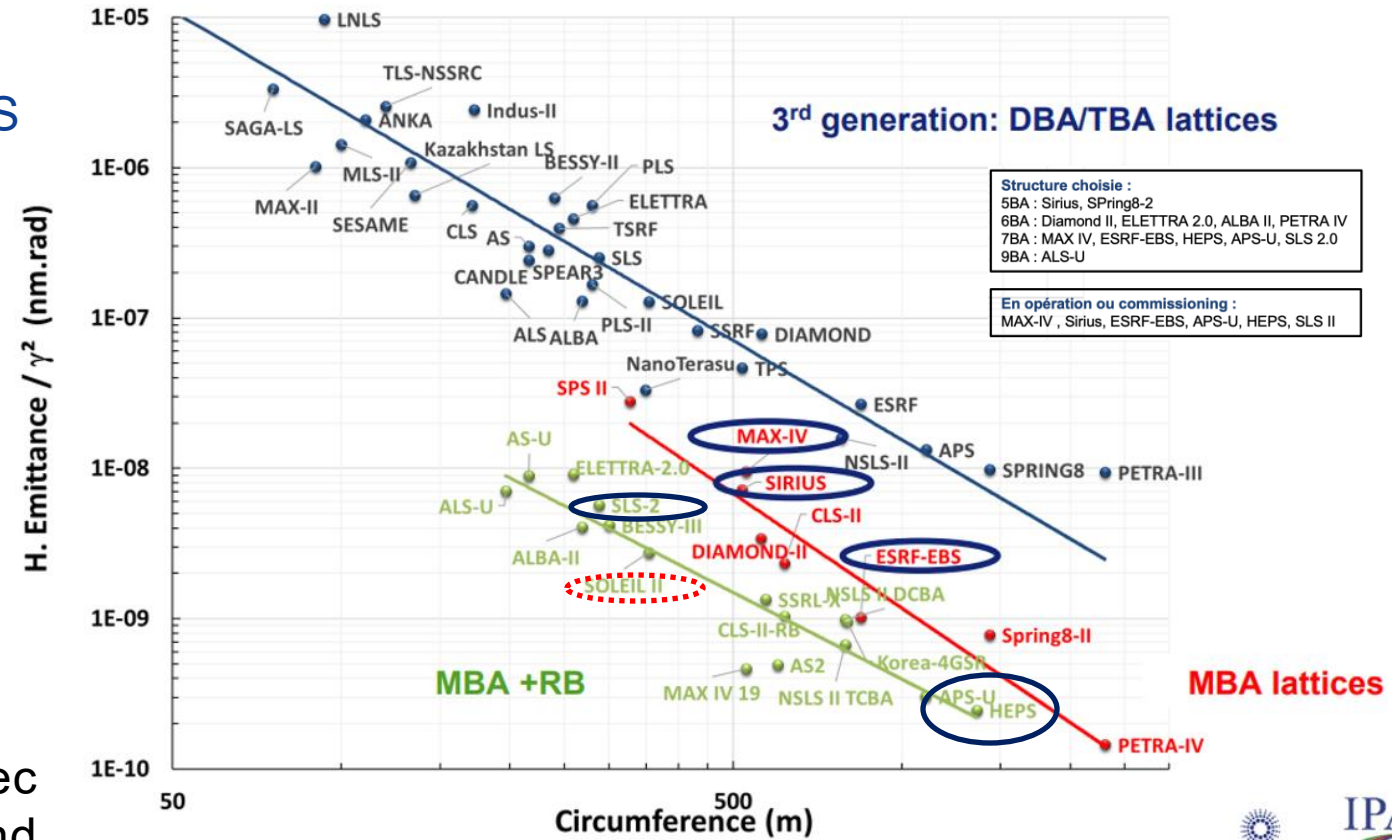


## Pourquoi :

- Meilleure **résolution spatiale** dans les deux plans.
- Augmentation du degré de **cohérence transverse** dans les deux plans.
- Augmentation de la **brillance des photons** avec un flux total (au moins) constant.

## Comment :

- Diminution de l'émittance horizontale avec une **maille de type MBA** (Multi Bend Archomat) pour exploiter la dépendance en  $1/N^3$ .
- Utilisation de « **dipôles inversés** » (reversed bend) pour optimiser l'optique (découplage fonctions betatrons/dispersion dans le dipôle)
- Maille "unique" **7BA – 4BA** pour rentrer dans le tunnel et minimiser l'impact sur les lignes.

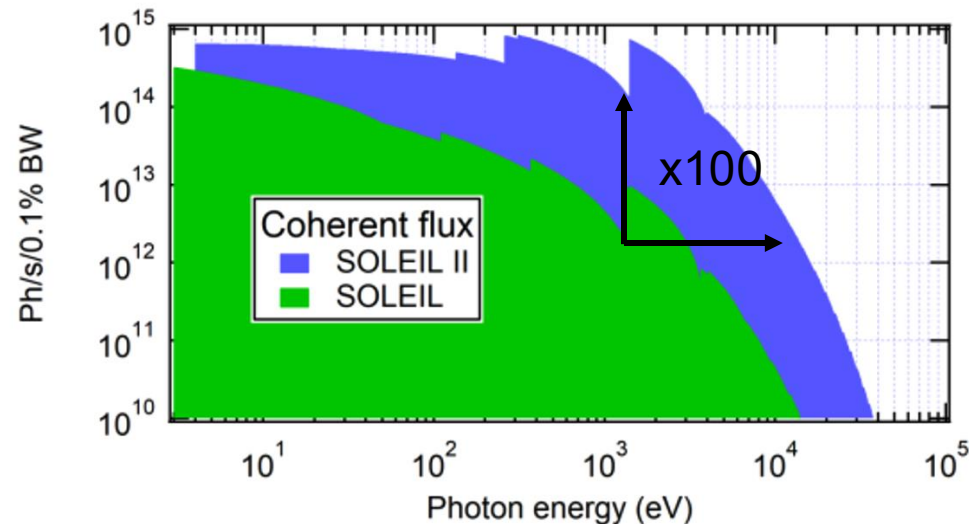
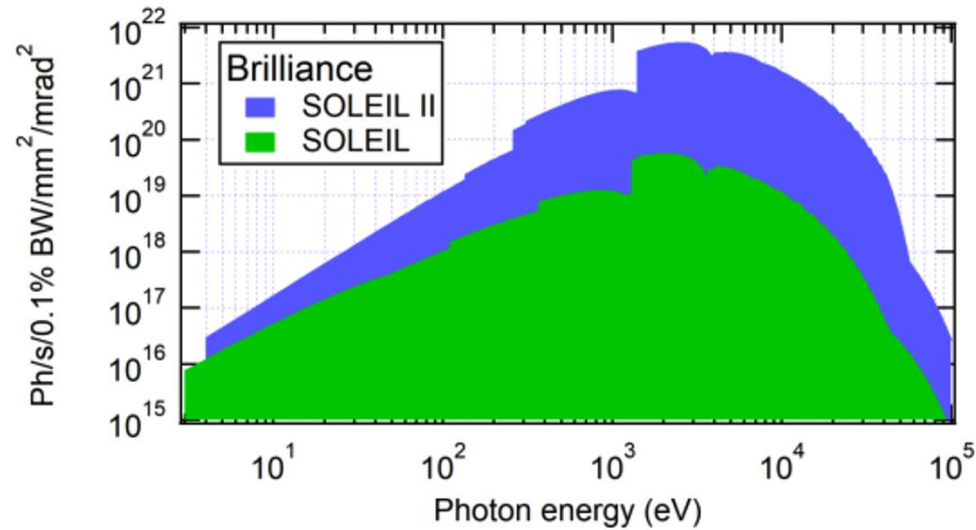


Lina Hoummi (ESRF, IPAC'23)

$$\varepsilon_x \approx F(\text{maille}) \frac{E^2}{N^3}$$

$$F_c = \frac{(\lambda_n/4\pi)^2}{(\varepsilon_x + \lambda_n/4\pi)(\varepsilon_z + \lambda_n/4\pi)}$$

Fraction de flux cohérent



Paramètres	SOLEIL	SOLEIL II
Énergie [GeV]	2,75	2,75
Circonférence [m]	354,10	353,98
Courant de faisceau maximal [mA]	500	500
Type de Maille	DBA	<b>7BA-4BA</b>
Nombre de Cellules	24	20
Emittance Naturelle [pm.rad]	<b>3 900</b>	<b>90</b>
Faisceau Rond (100% couplage)	-	<b>54</b>
Dispersion en Energie	1,02 E-3	0,93 E-3
Longueur Faisceau RMS (courant nul) [ps]	16,1	9,0
Temps d'Amortissement, $\tau_x/\tau_y/\tau_s$ [ms]	6,9 / 6,9 / 3,5	7,7 / 13,7 / 11,5
Facteur de Compression des Moments	4,2 E-4	1,06 E-4
Perte d'Energie par Tour [keV]	917	471
Tension RF [MV]	2,6	1,7
Fréquence RF [MHz]	352,200	352,314
Fréquence Synchrotron [kHz]	4,2	1,73

**Paramètres sans insertions et sans cavités harmoniques**  
**7 superbend à 2.92 T et 5 à 1.7 T**

1. Maille MBA non standard : 12 x 7BA + 8 x 4BA / 2.75 GeV / 354 m.
2. ~90 pm.rad (~65 pm.rad with avec insertion et faisceau rond [but ultime]).
3. « 22 » section droites (7 longueurs différentes).
4. Domaine spectral couvrant 9 ordres de grandeur (IR lointain aux X-durs).
5. Chambre à vide de faible diamètre avec dépôt de NEG (diamètre = 12 mm).
6. Utilisation extensive des aimants permanents (dip., rev. bend et **quadrupôles**).
7. Miniaturisation.
8. Injection hors-axe.
9. Un kicker d'injection multipolaire de haute performance (MIK).
10. Sobriété énergétique.

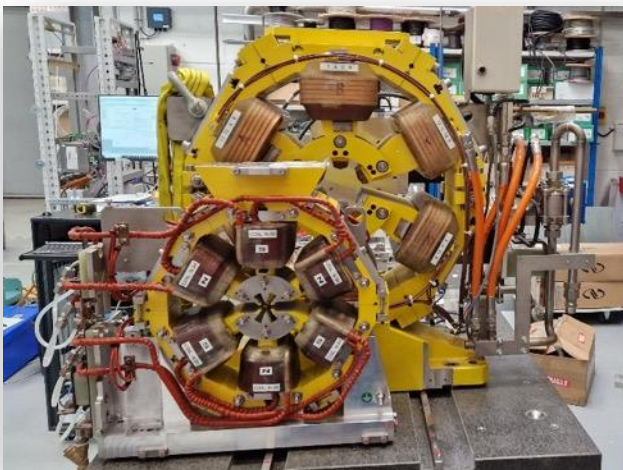
+

**LINAC\* (100 → 150 MeV)**  
**Nouveau Booster faible émit.**  
**Des insertions innovantes**

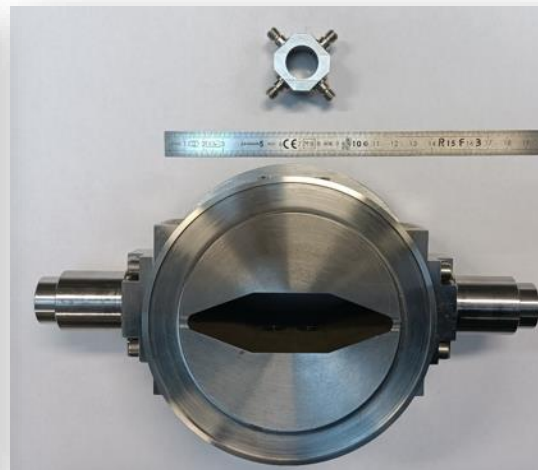
\* pré-upgrade



Quadrupole SOLEIL/SOLEIL II



Sextupole SOLEIL/SOLEIL II



Chambre à vide BPM SOLEIL/SOLEIL II

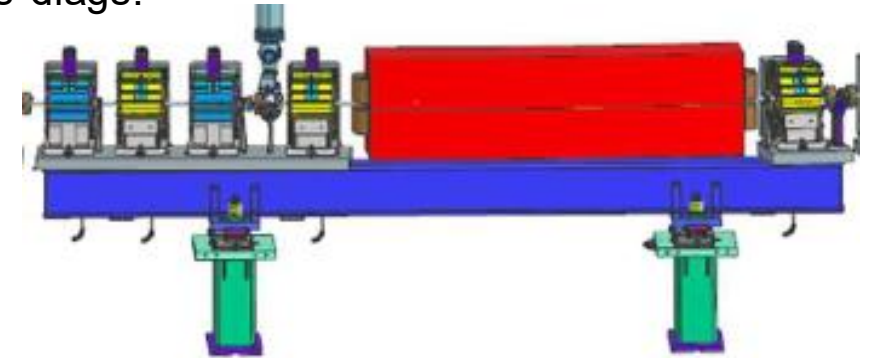
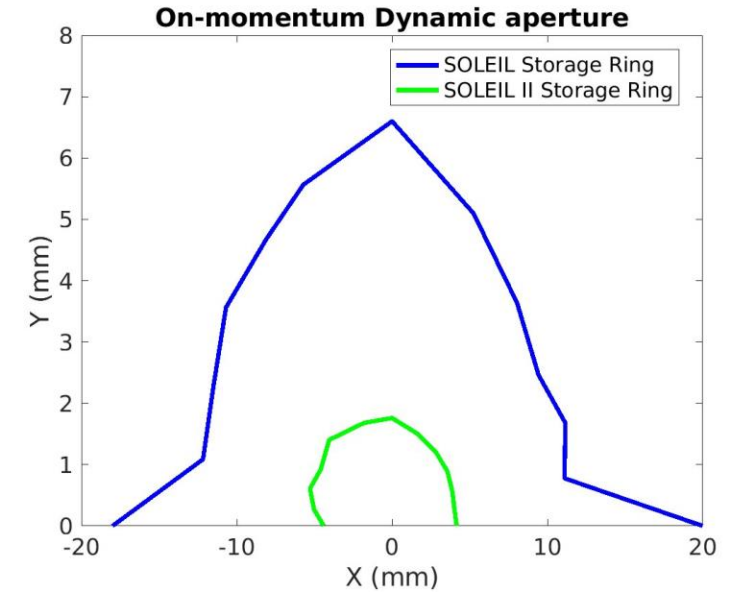
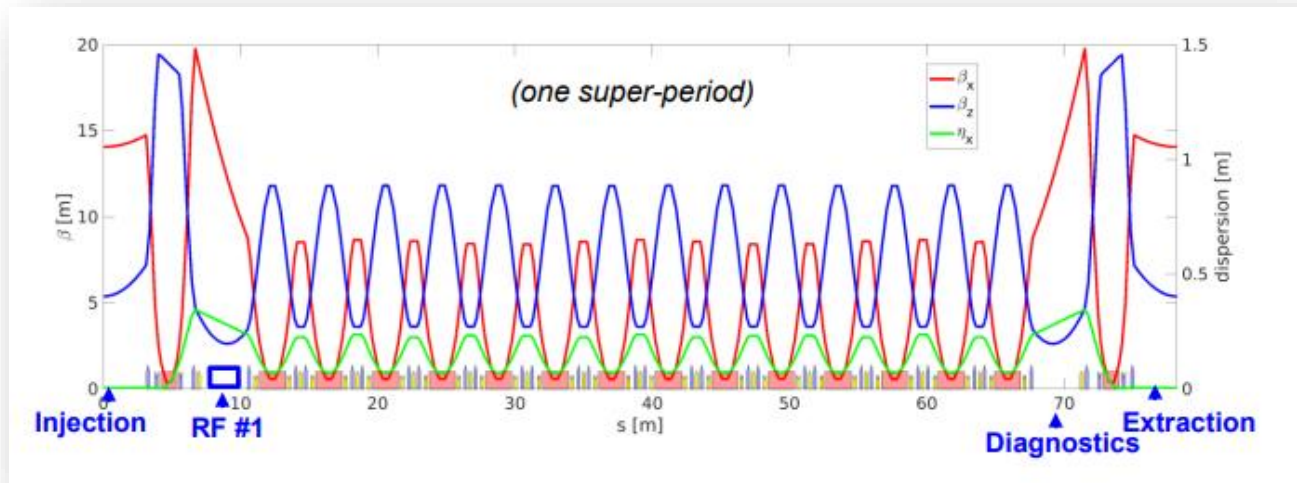
**Un projet ambitieux**  
**+**  
**Une expertise forte**  
**=**  
**Repousser les limites de la**  
**Science**  
**et de la Technologie**

L'injection dans l'anneau de stockage de SOLEIL II nécessite une **réduction drastique des dimensions du faisceau à l'extraction du booster** dans les plans transversal et longitudinal.

	Booster actuel	Booster SOLEIL II	
Type de maille	FODO	16 BA	
Emittance à l'extraction	140 nm rad	5.2 nm rad	} Valeur proche de l'émittance naturelle de SOLEIL (3.9 nm rad)
Longueur à l'extraction	50 ps	25 ps	

Maille de type **HOA 16 BA** :

- 14 cellules unitaires comprenant un **dipôle à fonction combinée (D+Q)**.
- 2 cellules d'adaptation.
- 1 section droite de 6,2 m de long (injection/extraction).
- 2 sections droites courtes de 3,44 m pour les deux systèmes RF (réutilisés) et les diags.



Cellule unitaire du booster SOLEIL II

# Début de la Phase de Construction de SOLEIL II

An invitation card for the launch of the first phase of SOLEIL II construction. The card has a blue header with the text "Un pas de plus vers SOLEIL II" and "LA SCIENCE ÉCLAIRE L'AVENIR". The main body is white with black text listing the attendees: Thierry DAUXOIS (President of the SOLEIL Synchrotron Council), Jean SUSINI (General Director of SOLEIL Synchrotron), Philippe BAPTISTE (Minister of Higher Education and Research), Antoine PETIT (General Director of CNRS), and François JACQ (General Administrator of CEA). The event is scheduled for Friday, March 14, 2025, at 15:00. Logos for CNRS, SOLEIL SYNCHROTRON, CEA, and the French Republic are at the bottom.

Un pas de plus vers  
**SOLEIL II**

LA SCIENCE  
ÉCLAIRE  
L'AVENIR

SCIENCE  
LIGHTS UP  
THE FUTURE

Thierry DAUXOIS  
Président du Conseil  
du Synchrotron SOLEIL

Jean SUSINI  
Directeur Général  
du Synchrotron SOLEIL

Ont le plaisir de vous inviter à l'occasion  
du lancement de l'étape 1 de SOLEIL II

En présence de

Philippe BAPTISTE  
Ministre chargé de l'Enseignement supérieur  
et de la Recherche

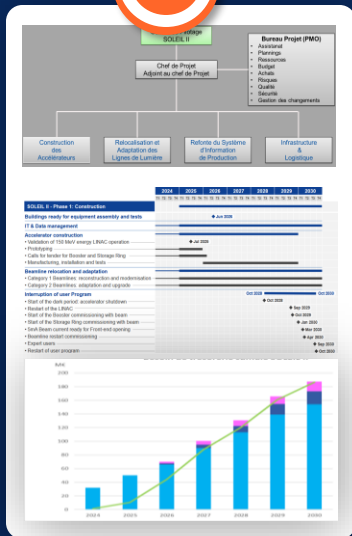
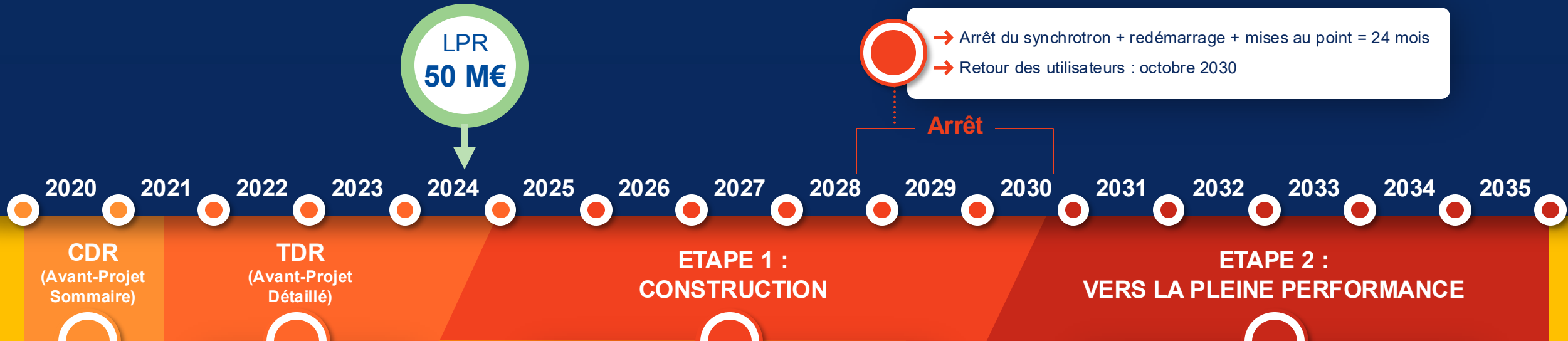
Antoine PETIT  
Président-directeur général  
du CNRS

François JACQ  
Administrateur général  
du CEA

Vendredi 14 mars 2025 à 15 heures

# Chronologie et structuration du projet SOLEIL II



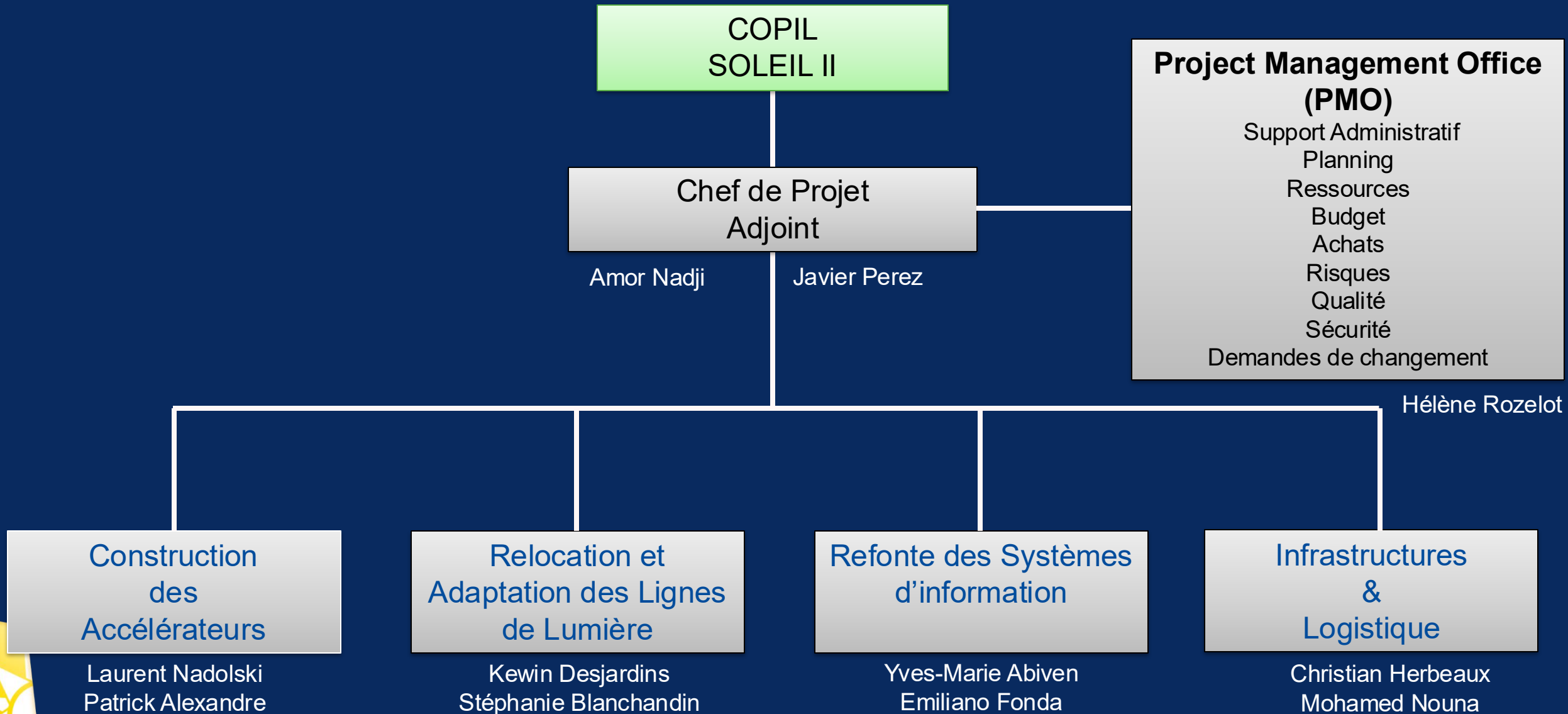
- Arrêt et démontage du booster et de l'anneau de stockage
- Mise en service des nouveaux booster et anneau de stockage
- Adaptation et redémarrage des lignes de lumière
- Modernisation des laboratoires supports
- Programme R&D sur l'instrumentation

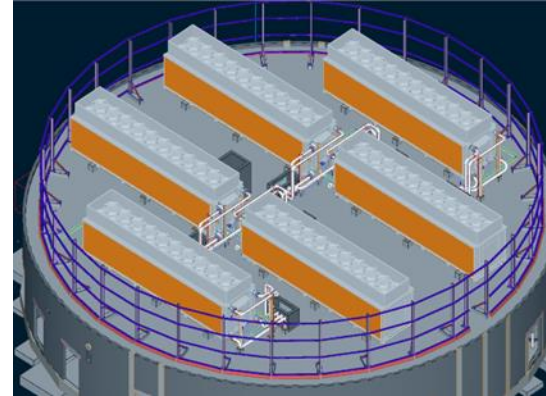
- Pleine performance des Accélérateurs
- Modernisation complète des lignes de lumière
- Développement des laboratoires supports
- Programme de R&D sur l'instrumentation
- Evolution vers des techniques d'analyse innovantes

Budget  
de SOLEIL II  
**~ 309 M€**  
(incluant 15% d'aléas)

**ETAPES 1 (6 ans) : ~ 186 M€**

**ETAPES 2 (5 ans) : ~ 123 M€**





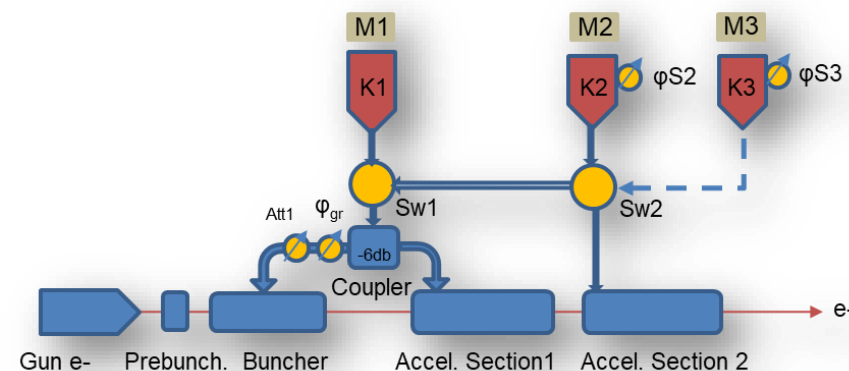
- Financé dans le cadre du plan France Relance (12,67 M€) en 2020
- Fin de la construction en décembre 2023
- Interconnexion avec le synchrotron début 2024
- En production depuis 2024



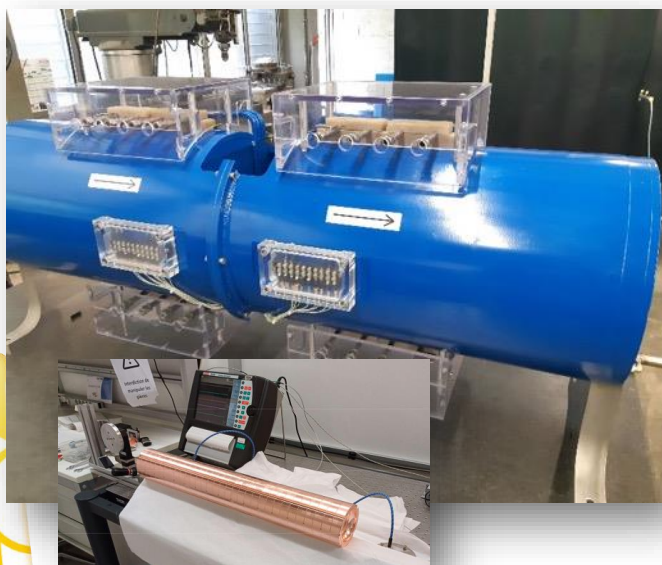
- Depuis la mise en service :
- 80 % d'économie d'eau
  - 2 GWh d'économie d'électricité annuel

**Mise à niveau du Linac** en plusieurs étapes pour résoudre les problèmes d'obsolescence et se préparer au projet SOLEIL II :

- Un **groupeur** de rechange fabriqué par THALES AVS sera installé au début de 2026 pour récupérer des performances à haut gradient (15 MeV par rapport à 12 MeV aujourd'hui) et obtenir un équipement de rechange.
- JEMA Energy a livré en 2024 un **modulateur** basé sur SSPA pour permettre de maintenir l'énergie nominale du faisceau au lieu des 66 MeV actuels, même en cas de défaillance du klystron.

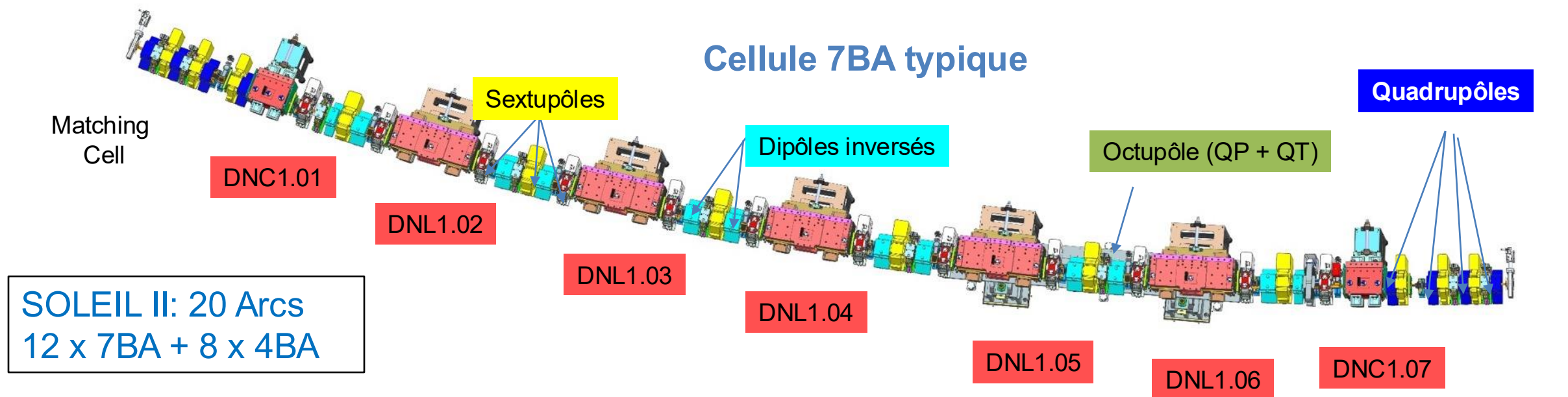


Le but est d'**augmenter l'énergie du LINAC** et de sa ligne de transfert à **150 MeV** (au lieu de 110 MeV) en 2026 pour faciliter l'injection dans le nouveau booster à faible émittance de SOLEIL II.



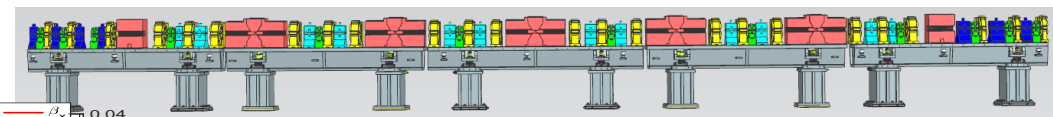
3<sup>e</sup> modulateur à semi-conducteurs pour klystron et klystron

La maille de l'anneau a été "stabilisée" en mars 2025 : plus de modifications majeures, modifications mineures uniquement si nécessaire (intégration mécanique, finalisation des aimants ...)

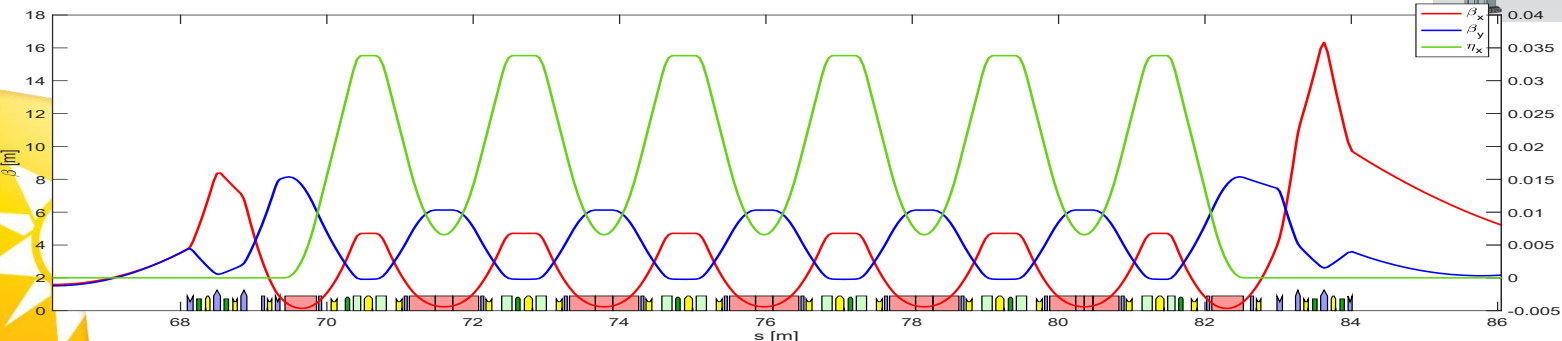
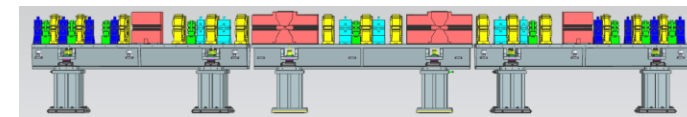


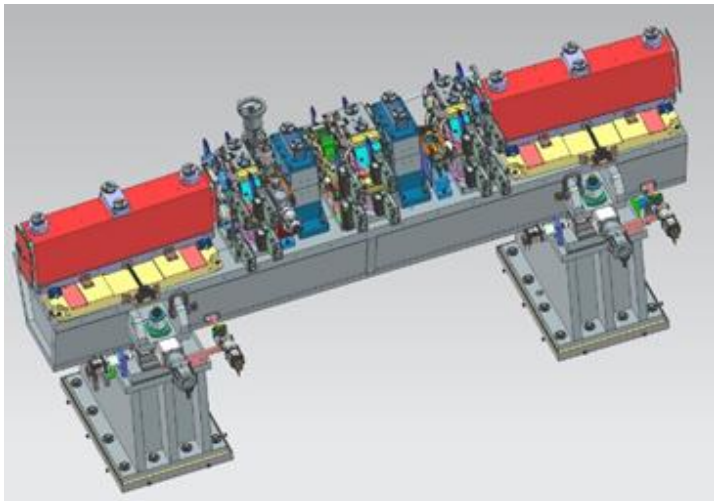
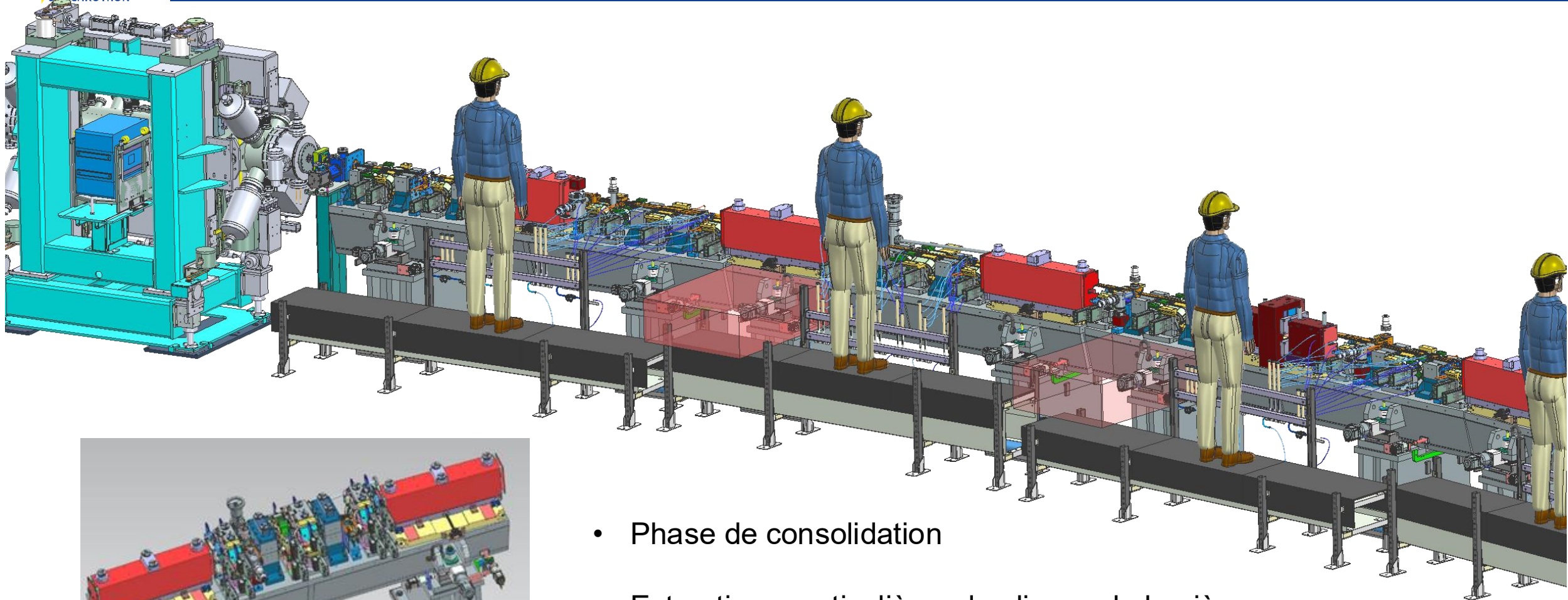
~103 fonctions d'aimants / 7BA

7BA



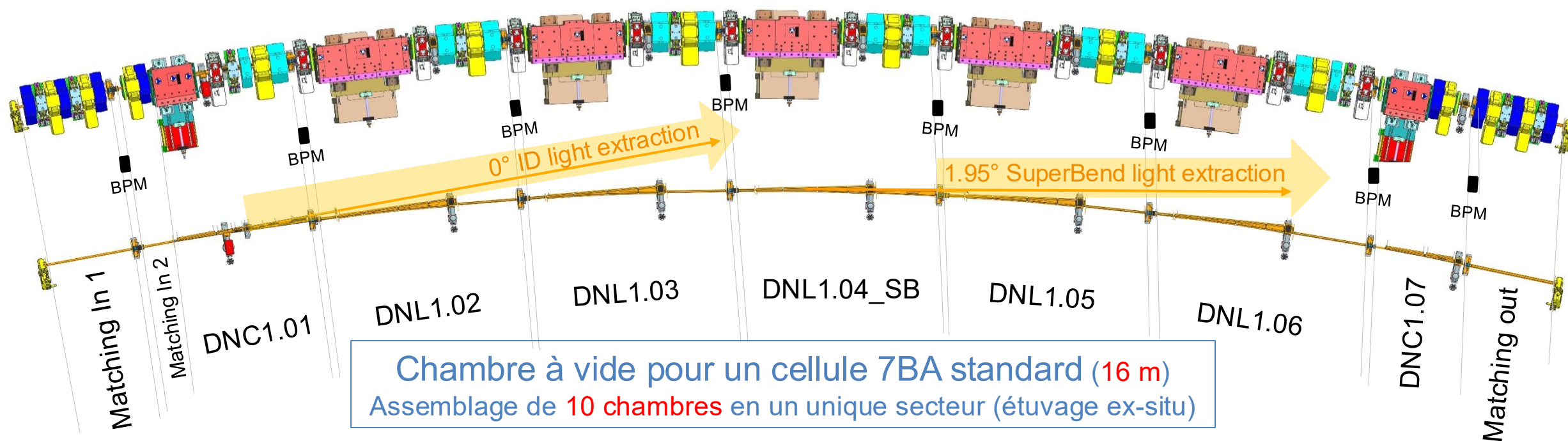
4BA





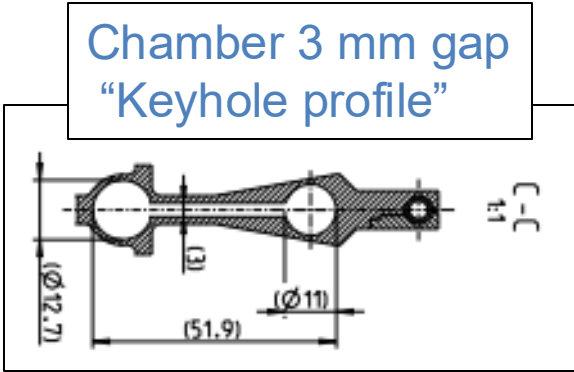
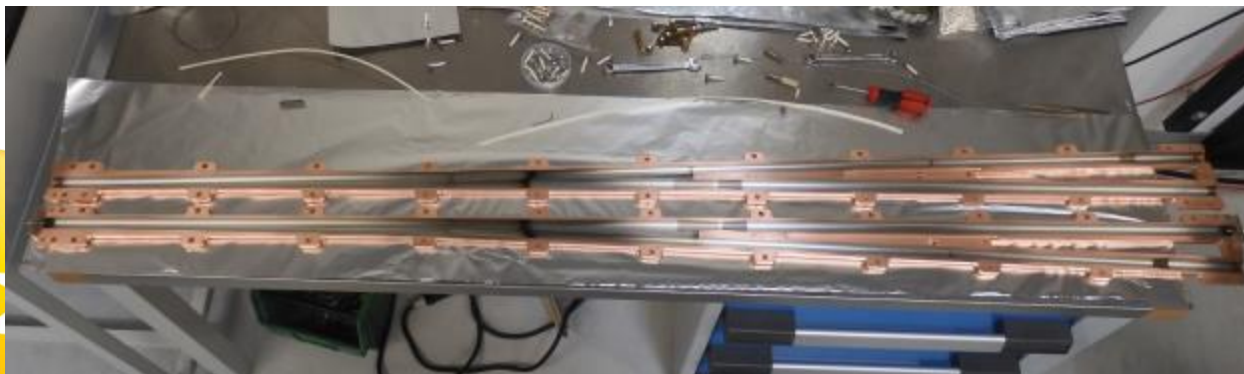
Exemple de poutre

- Phase de consolidation
- Extractions particulières des lignes de lumière
- Identification des interfaces
- Préparation des appels d'offres



Chambre à vide pour un cellule 7BA standard (16 m)  
Assemblage de 10 chambres en un unique secteur (étuvage ex-situ)

## Prototypes de chambres dipôle reçus en 2024:



Matériau :  
Cu-OFS ou CuCrZr  
avec dépôt de NEG



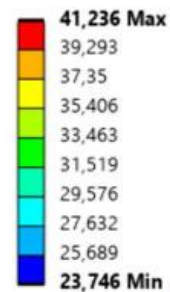
FMB  
BERLIN

Marchés innovants

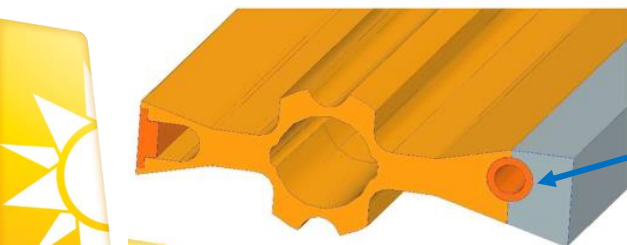
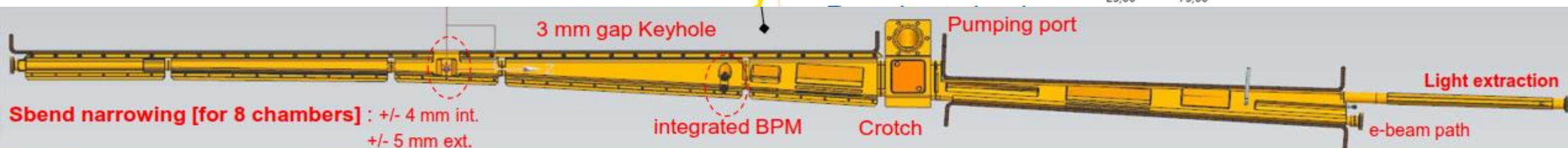
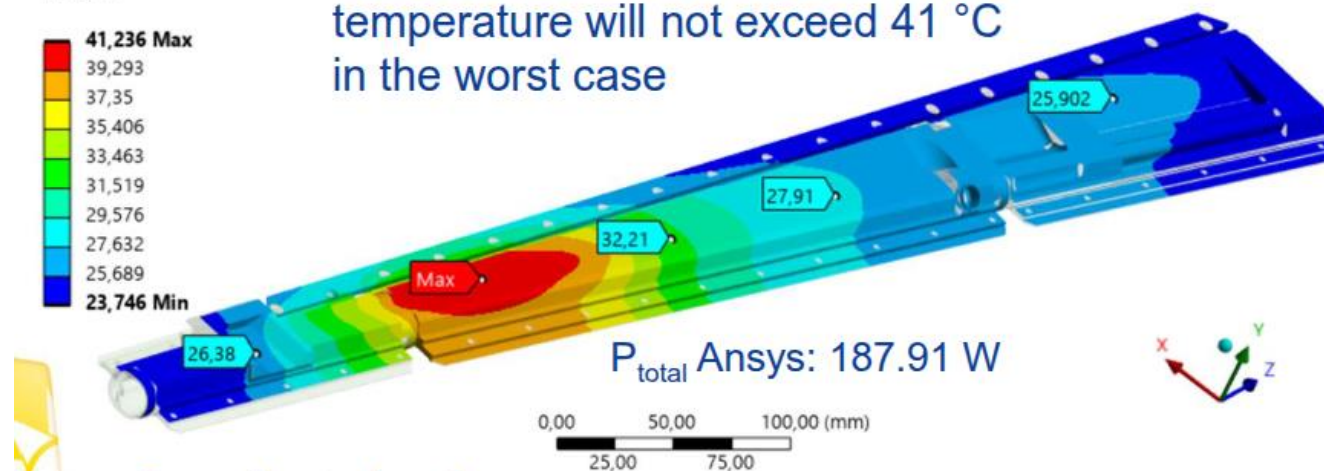
Plusieurs problématiques impactent le design des chambres à vides et sont difficiles à concilier :

- Gestion de la puissance photon déposée.
- Passage des aimants.
- Passage du rayonnement utilisateur.
- Fréquence de coupure EM des chambres à l'emplacement des correcteurs rapides.
- Emplacement pour zones de pompage.
- Impédance géométrique du faisceau.

Temperature Extérieur  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1 s

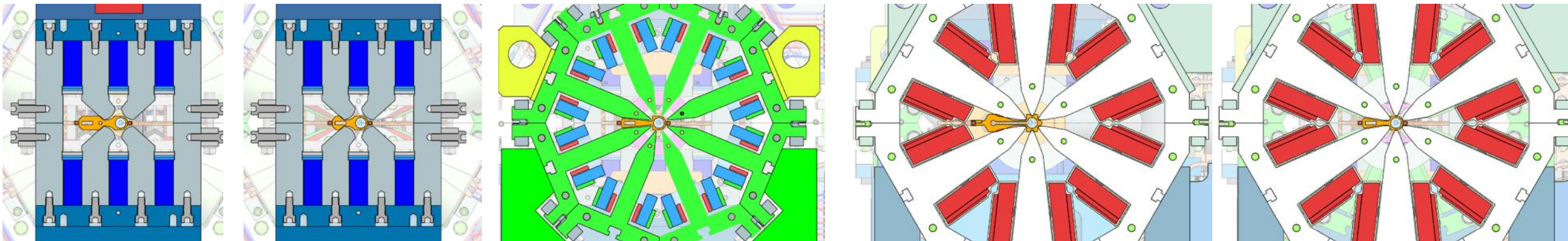


Vacuum chamber outer shell temperature will not exceed 41 °C in the worst case

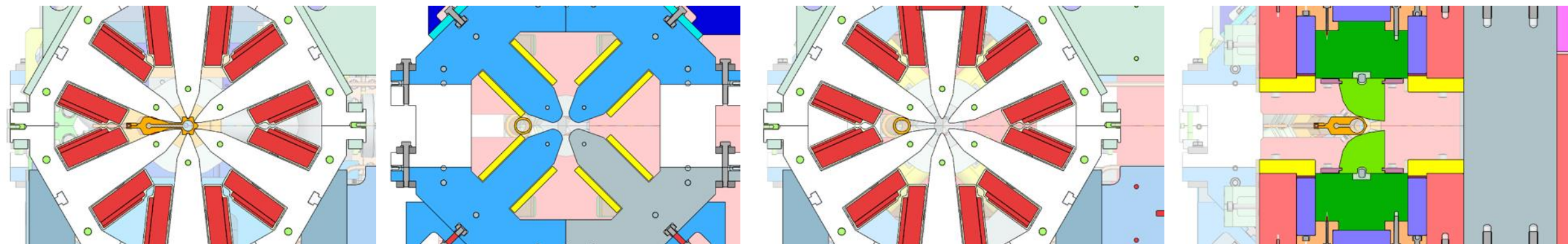


Canaux de refroidissement

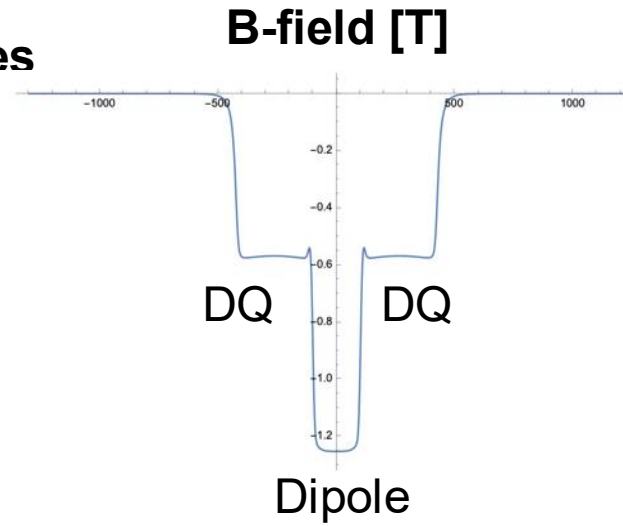
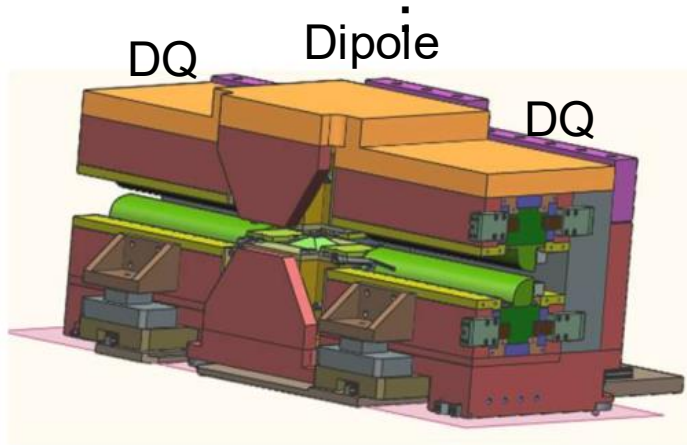
Une très grande variété d'aimants permanents et d'aimants électromagnétiques



Une fois la maille "stabilisé", toutes les interférences entre les chambres à vide "photon" et les éléments magnétiques doivent être identifiées.



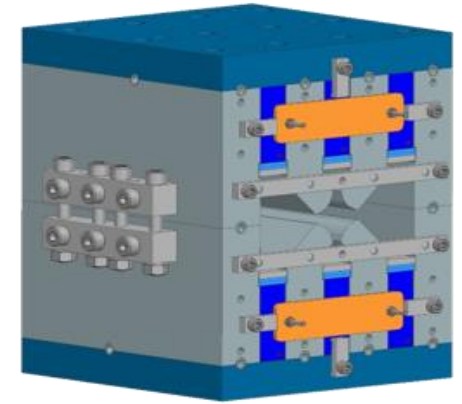
## Aimants permanents en 3 parties



## Quadrupôle permanent :



PRECIS-FIL



Phase de montage  
de l'aimant  
prototype



116 dipôles  
196 dipôles inversé

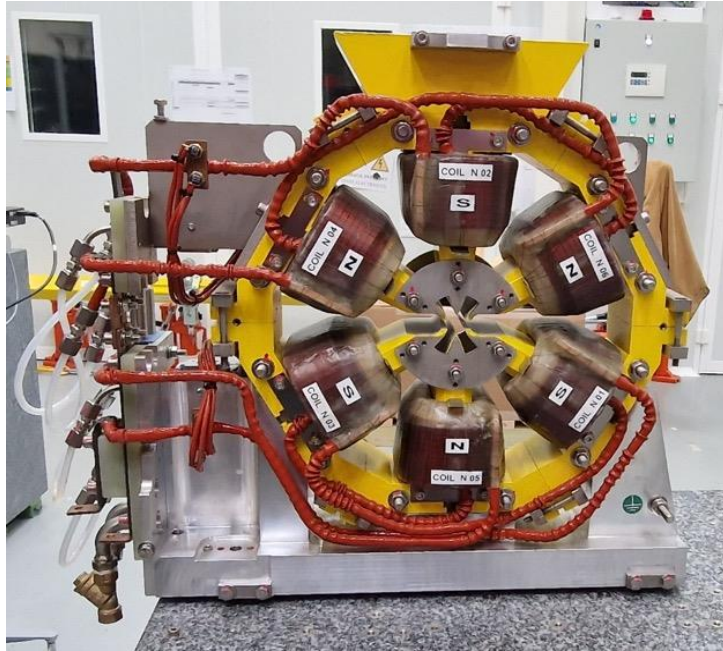


144 quadrupôles

**Max gradient: 120 T/m**

(SOLEIL: 20 T/m)

## Prototype du sextupôle :

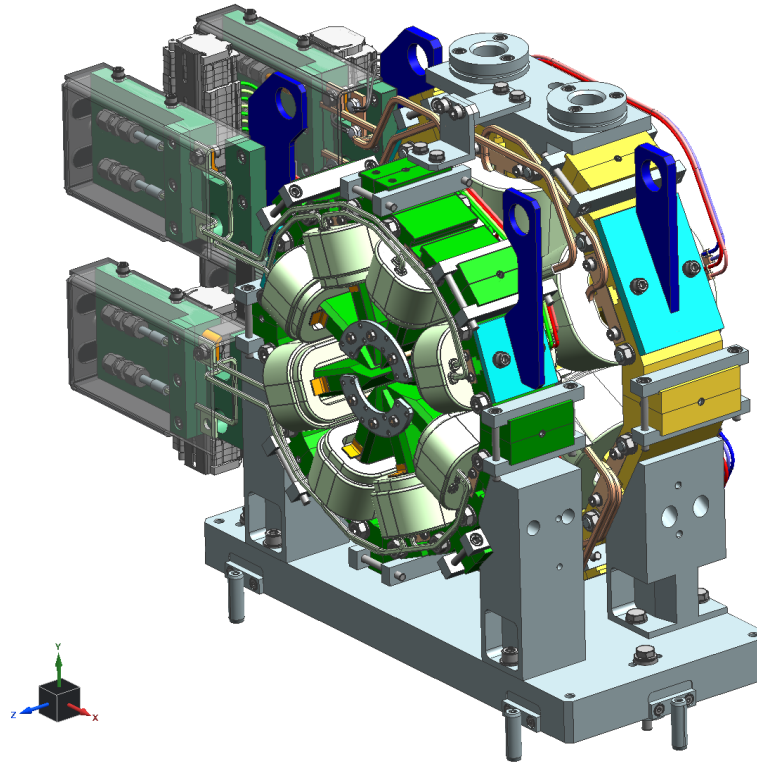


408 sextupôles

**Jusqu'à 8500 T/m<sup>2</sup>.**

(SOLEIL : 320 T/m<sup>2</sup>)

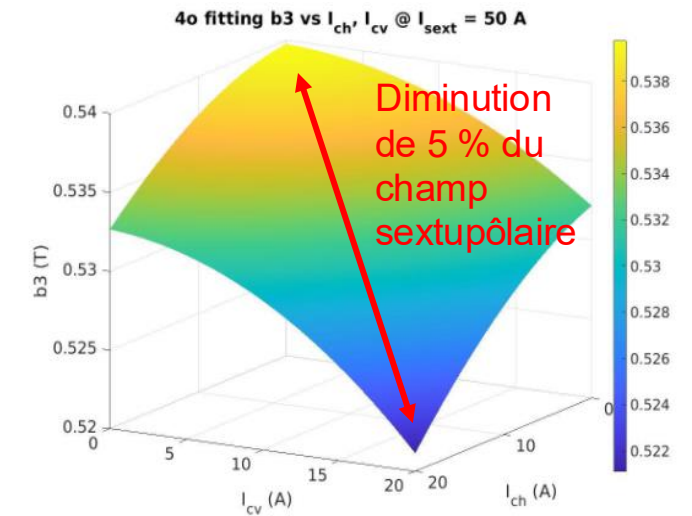
Afin de garantir un **alignement magnétique très précis** (de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ ) entre les **sextupôles et les quadrupôles de correction**, ces électroaimants seront montés sur une structure de support commune.



**Doublet  
Sextupole-Octupole**

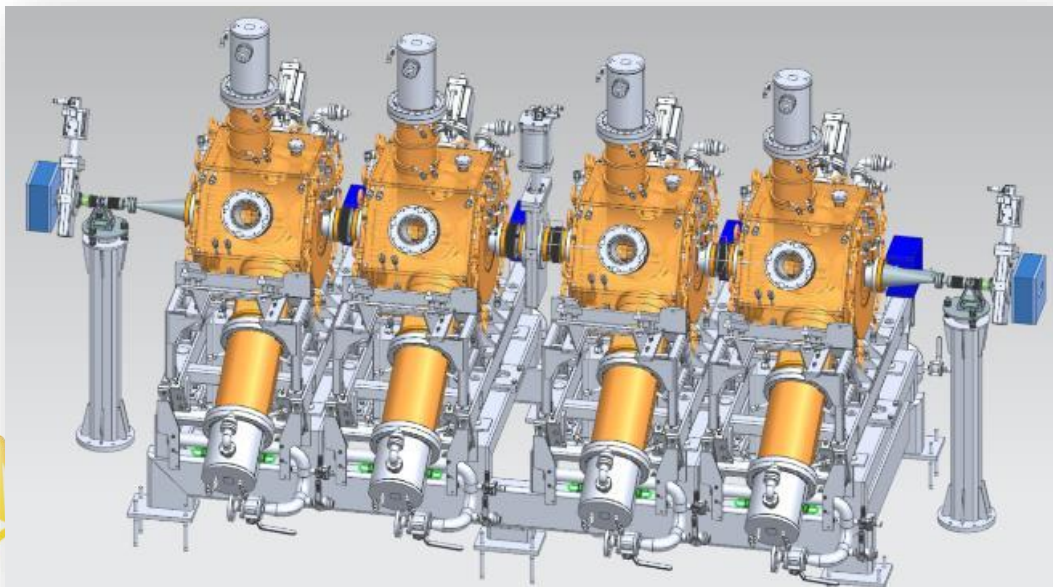
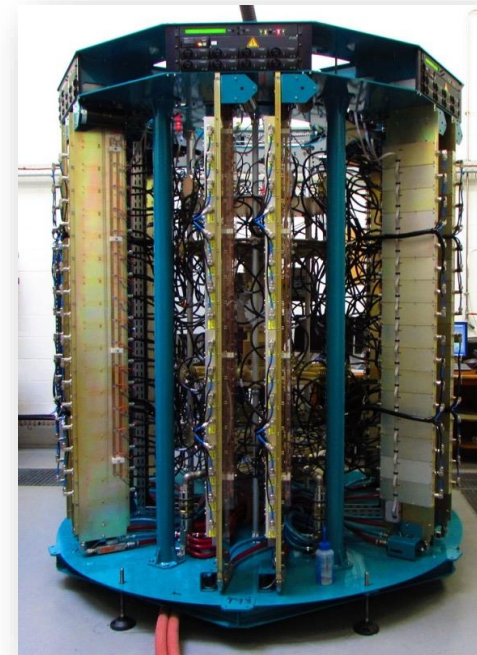
Le contrôle de ces électro-aimants sera particulièrement complexe :

- **Cross-talk inters-aimants** (aimants très proches)
- **Cross-talk intra-aimants** (entre correcteur dipolaire et sextupôle par ex.)
- **Hystérésis** non négligeable



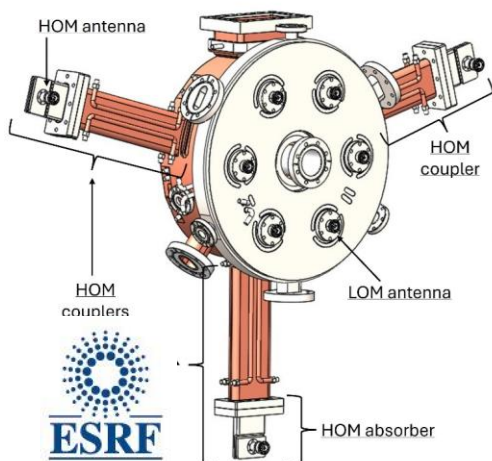
## Mise à niveau des alimentation 352 MHz :

- Remplacement du redresseur et des convertisseurs DC/DC par des convertisseurs AC/DC directs.
- **Amélioration de l'efficacité** de l'alimentation électrique de 87% à **96%**.
- Réduction des coûts opérationnels permettant de compenser les coûts d'investissement en 3 à 4 ans.
- Depuis début 2024, une tour de 50 kW est installée tous les 2 à 3 mois dans l'anneau afin d'avoir **tout remplacé d'ici mi-2027** pour SOLEIL II.
- Cela devrait entraîner des **économies d'énergie de 1,75 GWh par an**.



## Nouvelles cavités principales pour SOLEIL II :

- Contrat signé fin 2024 pour la fabrication de **5 cavités amorties HOM 352 MHz** (type ESRF-EBS).
- Nouveau système le **LLRF digital** pour le contrôle des cavités, déjà testé avec succès sur SOLEIL.
- 1ere étape de **conditionnement dans un bunker RF** sur site à partir de juillet 2026.
- **Installés dans l'anneau de SOLEIL en 2027** pour tests et conditionnement faisceau.

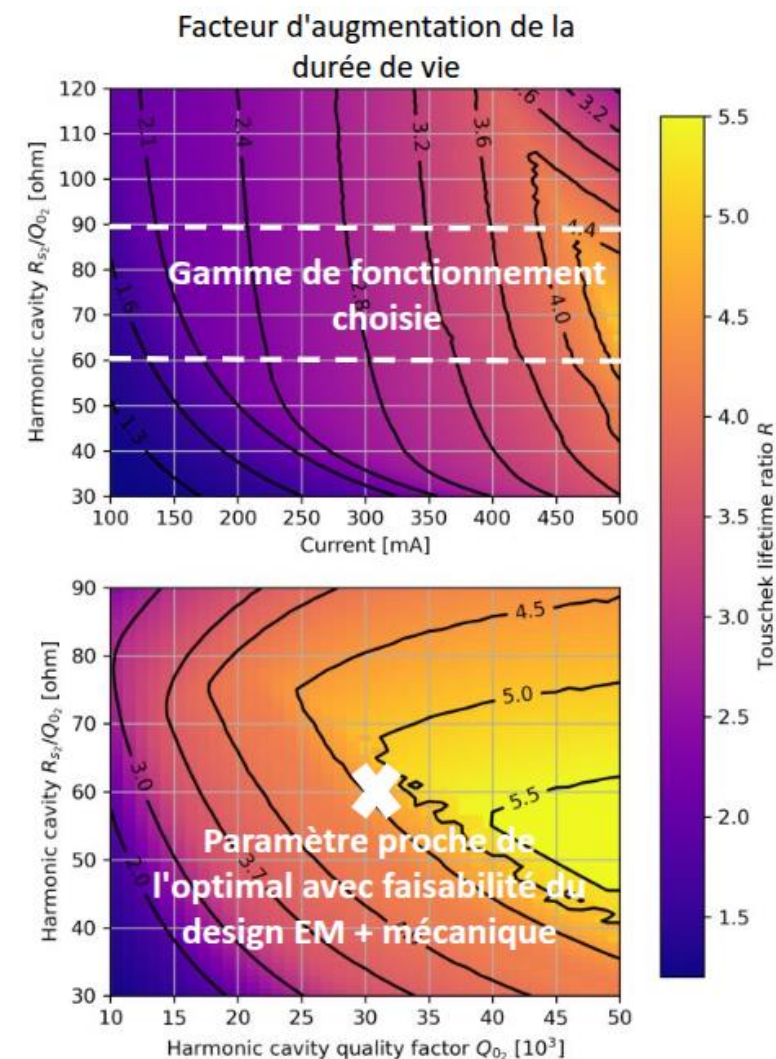


Les faisceaux de **très petites dimensions transverses** de SOLEIL II entraînent une **diminution drastique de la durée de vie** du faisceau de 20 h sur SOLEIL à 3 h sur SOLEIL II.

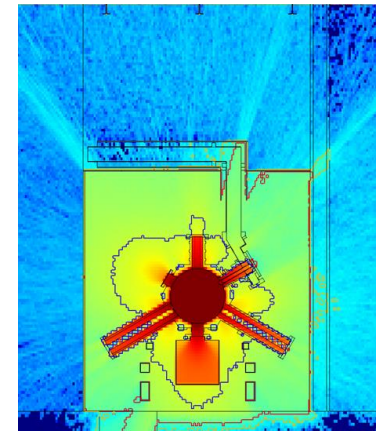
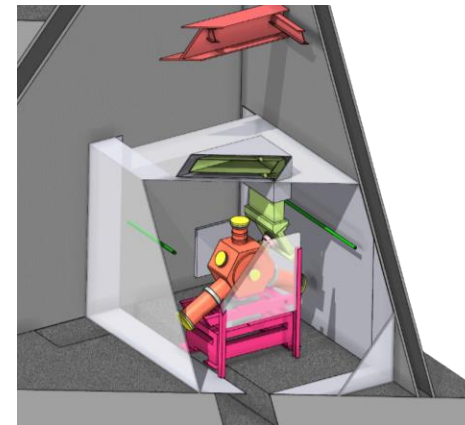
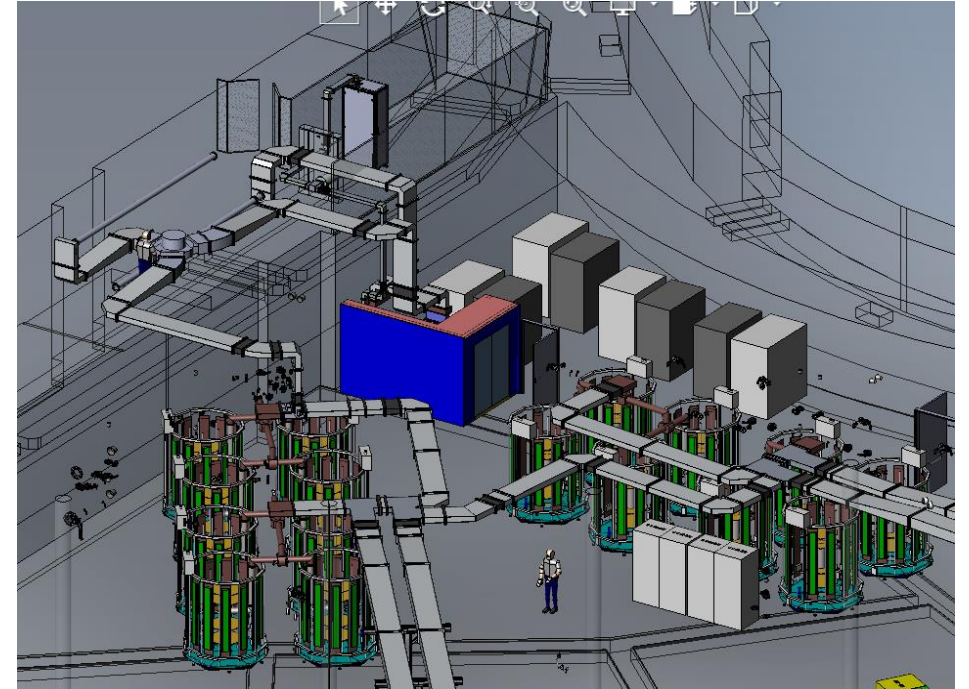
Une solution pour réduire ces effets est d'**allonger les paquets** en utilisant une **cavité harmonique**.

Cavité passive de **4ème harmonique (1.41 GHz)** pour allonger les paquets dans SOLEIL II :

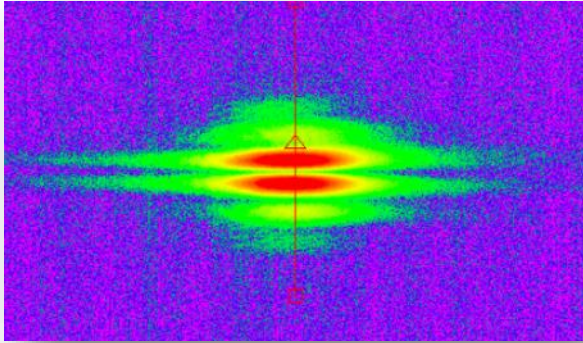
- **Augmentation de la durée de vie** Touschek d'un **facteur 3 à 4**.
- **Nouveau design innovant** réalisé par l'ESRF selon les besoins de SOLEIL II.
- **Faible  $R/Q = 29.6 \Omega$** , pour éviter les instabilités du faisceau.
- $V_{\max} = 350 \text{ kV}$
- $Q_0 = 31\,000$
- **TM020 utilisé en tant que en mode principal**.
- Amortissements des modes parasites d'ordre inférieurs (TM010) et supérieurs.
- Port de couplage pour un conditionnement hors faisceau (et la possibilité d'en faire une cavité active si besoin).
- Appel d'offre lancé en 2025 pour **3 cavités**.
- Réception d'un premier en série mi-2027.
- **Installation sur SOLEIL en 2028** pour conditionnement faisceau.



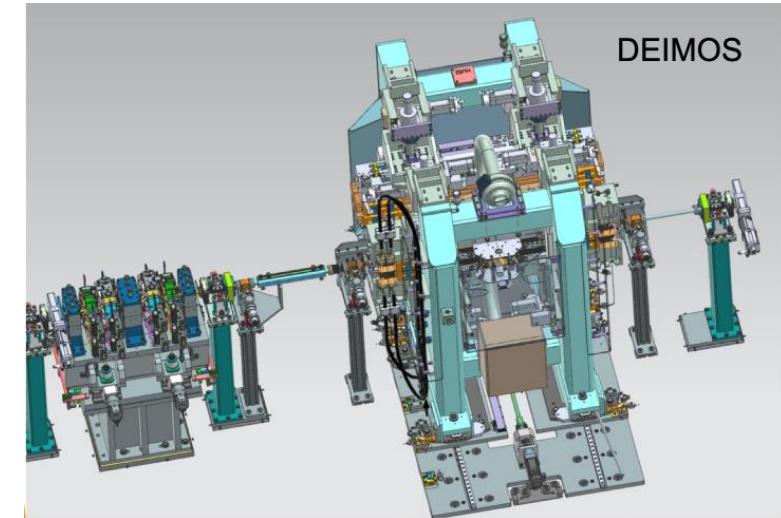
- La casemate RF sera adaptée d'ici avril 2026.
- La zone de test sera achevée à la fin du mois d'août 2026.
- Les composants de puissance situés sur le toit du LINAC permettront le conditionnement des cavités et des coupleurs pour le BOO et l'ANS (MC + HC) à partir de septembre 2026.



Premières mesures de la taille  
du faisceau en imagerie  
polarisée dans le visible !

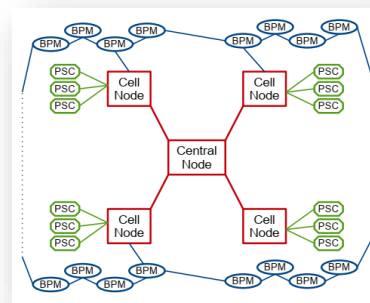


Validation de nouveaux concepts d'onduleurs.

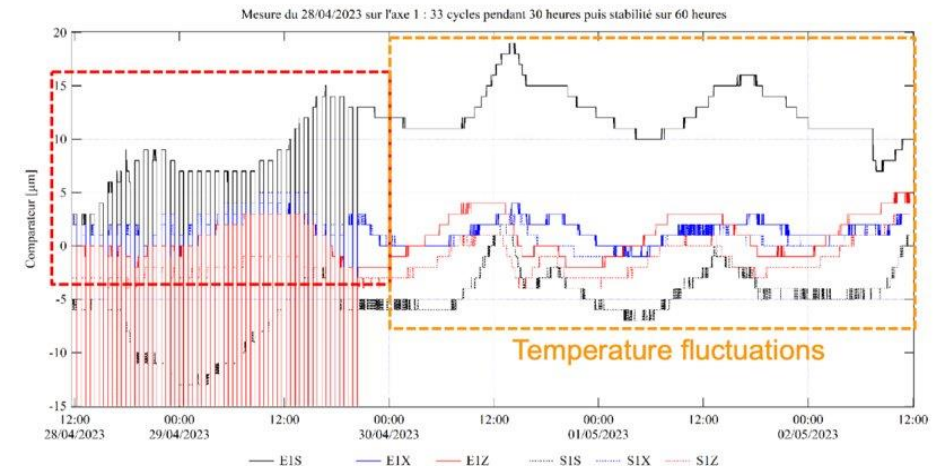


Développement et installation de la nouvelle architecture  
pour le Fast Orbit Feedback (FOFB) :

μTCA Plateforme (cell/central node):

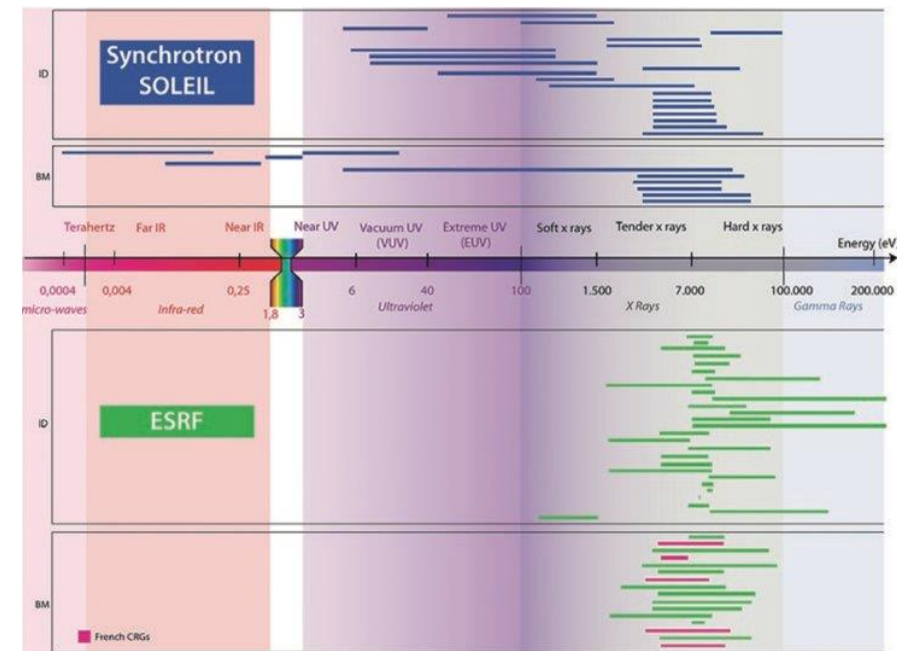


**Validation of the DUAL prototype**



**En production depuis début 2024**

- **SOLEIL II : upgrade très ambitieux et complémentaire à l'ESRF-EBS**
  - Un nouveau SOLEIL pour la science de demain avec des performances de niveau mondial.
- **Finaliser la faisabilité technique**
  - Une intense phase R&D avec les **différents prototypes reçu** dans ces dernières années.
  - **Maille consolidée d'ici fin 2025**, phase intense de finalisation de l'intégration mécanique.
  - Résoudre les défis techniques restants (contrôle des aimants, collimation, fréquence de coupure des chambres à vides, etc.).
- **Début de la phase de construction**
  - **50 M€ obtenus en 2024** avec la LPR (sur une enveloppe de 186 M€ pour la phase 1 de SOLEIL II).
  - De **nombreux contrats ont déjà été signés** (cavités RF, électronique BPM, ...).
  - 2026 verra les appels d'offres des chambres à vide, des aimants, ...
- **Les Injecteurs**
  - Montée en énergie du **LINAC à 150 MeV en 2026**.
  - Stabilisation de la maille du booster et intégration mécanique du booster en 2026.




EXPERIMENTS UP TO  
**10,000 TIMES FASTER**




**NANOSCALE  
RESOLUTION**



EXPERIMENTS UP TO  
**1000 TIMES MORE  
SENSITIVE**



**STUDY OF DEVICES  
IN REAL OPERATING  
CONDITIONS**



**UNIQUE LIGHT SOURCE,  
FROM INFRARED  
TO HARD X-RAYS**



**COMPLEMENTARY  
BEAMLINES  
AND TECHNIQUES**

<https://www.synchrotron-soleil.fr/fr/emplois>

Poste	Type de contrat	Date de mise à jour
Ingénieur.e en génie électrique (courant fort / courant faible)	CDI	5 septembre 2025
Ingénieur.e CVC / Fluides – Pôle Projet	CDI	5 septembre 2025
Ingénieur.e DevOps & Intégration Logicielle	CDI	27 août 2025
Ingénieur.e d'études et développement Python / C++	CDI	27 août 2025
Assistant.e ingénieur.e	CDI	7 juillet 2025
Ingénieur.e en génie climatique	CDD	16 juillet 2025
Ingénieur IHM Web / Python	CDD	25 avril 2025
Apprenti.e Ingénieur.e DevOps & Intégration Logicielle	Alternance	25 avril 2025
Ingénieur électronique d'acquisition / traitement numérique	CDI	22 avril 2025



## Contact

Coordinateur du Programme de la  
Construction des Accélérateurs  
SOLEIL II

[laurent.nadolski@synchrotron-soleil.fr](mailto:laurent.nadolski@synchrotron-soleil.fr)

