

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

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

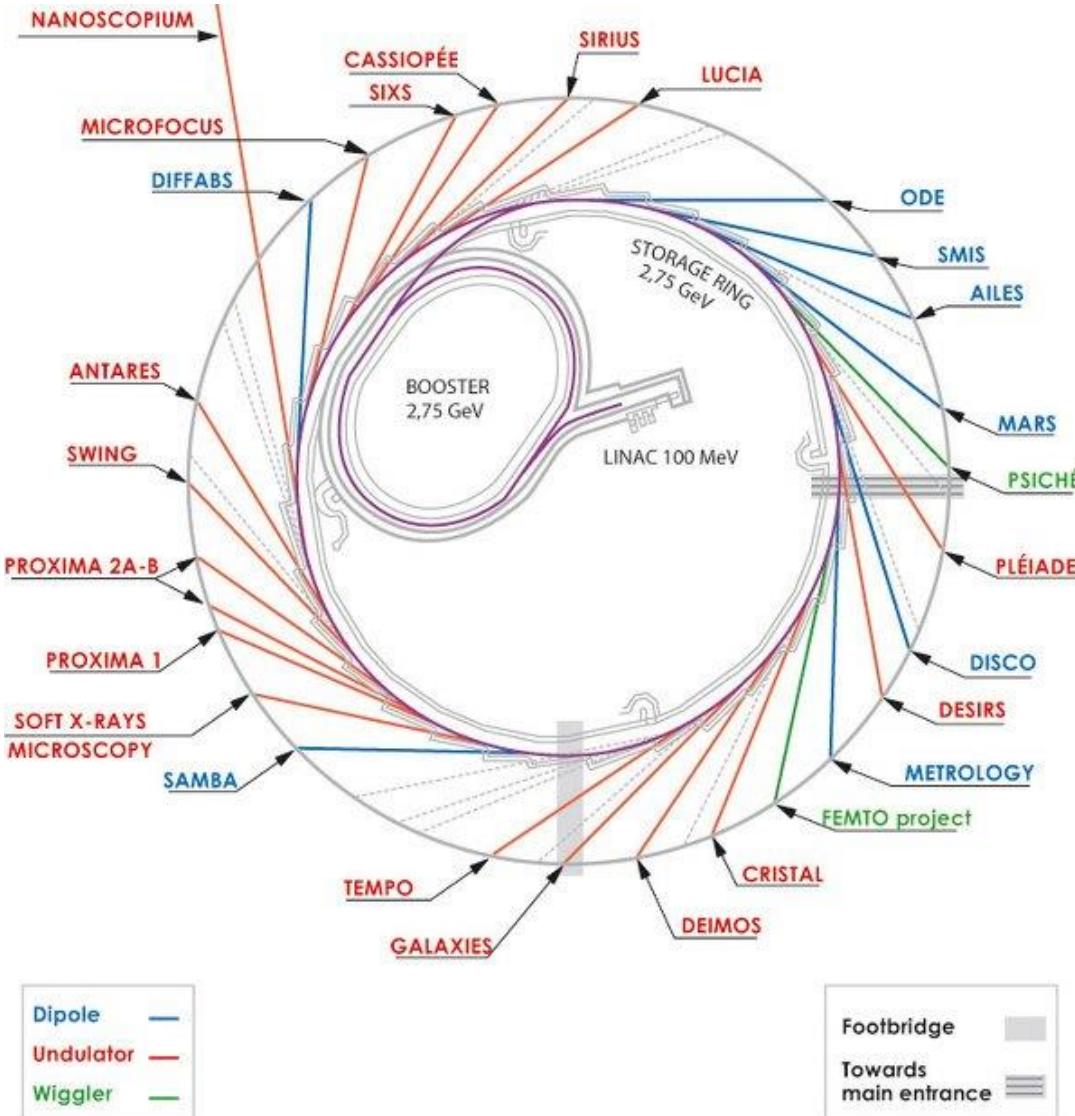


SOLEIL est la source de rayonnement synchrotron nationale française mise en service en 2006.

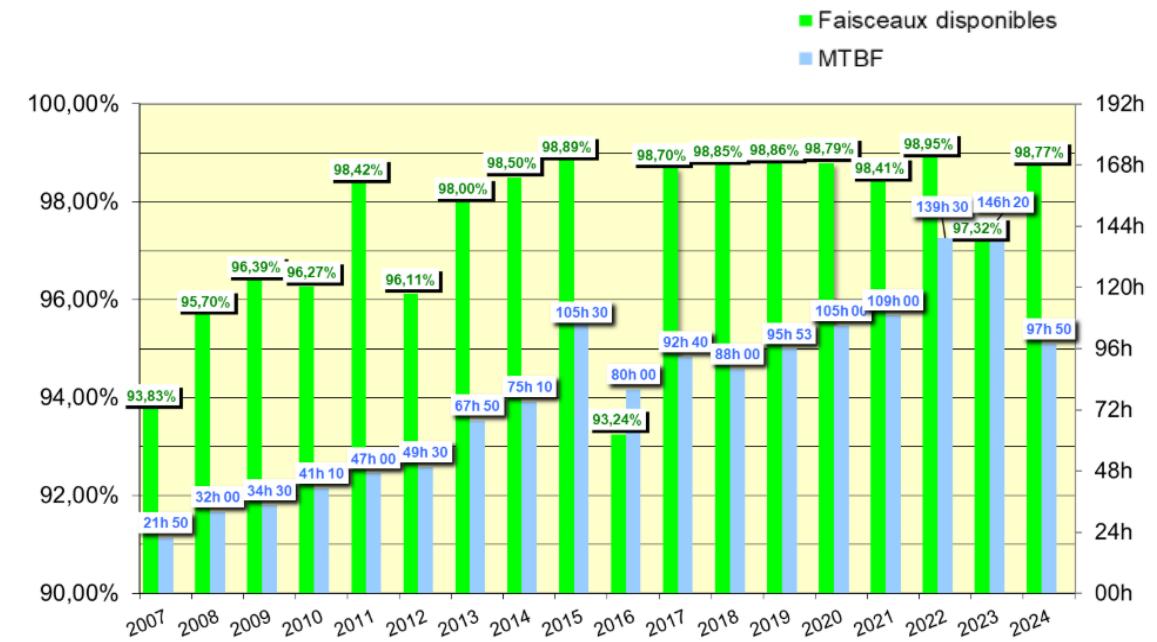
Il s'agit d'un accélérateur de particules à grande échelle qui fournit du **rayonnement synchrotron** pour de vastes domaines de la recherche scientifique.

- 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**.

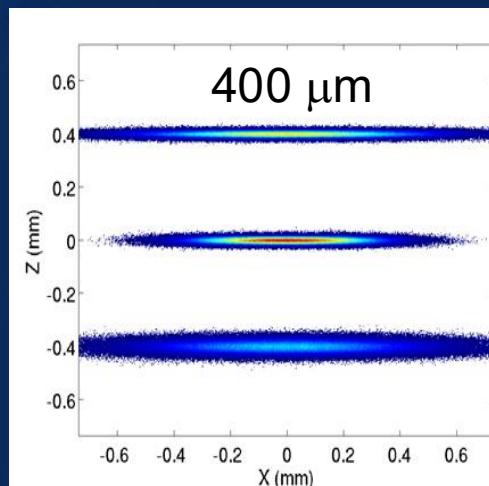


- Environ 5 000 h de faisceau par an pour les utilisateurs avec une disponibilité du faisceau proche de 99 %.
- ~70 % du temps pour des utilisateurs académiques externes.
- ~20 % du temps en usage interne à SOLEIL.
- ~10 % du temps pour les utilisateurs industriels.
- + de 8 000 articles publiés depuis 2008.

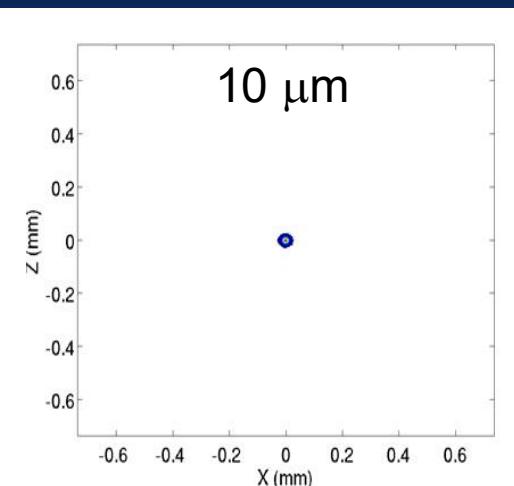


SOLEIL II en Quelques mots

3ème génération



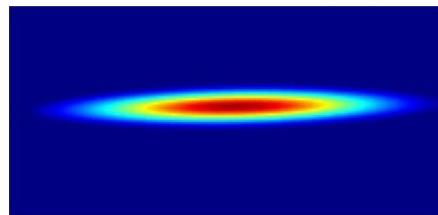
4ème génération



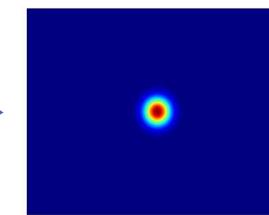
SOLEIL
 $\epsilon = 3.9 \text{ nm.rad}$

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

3GLS



4GLS

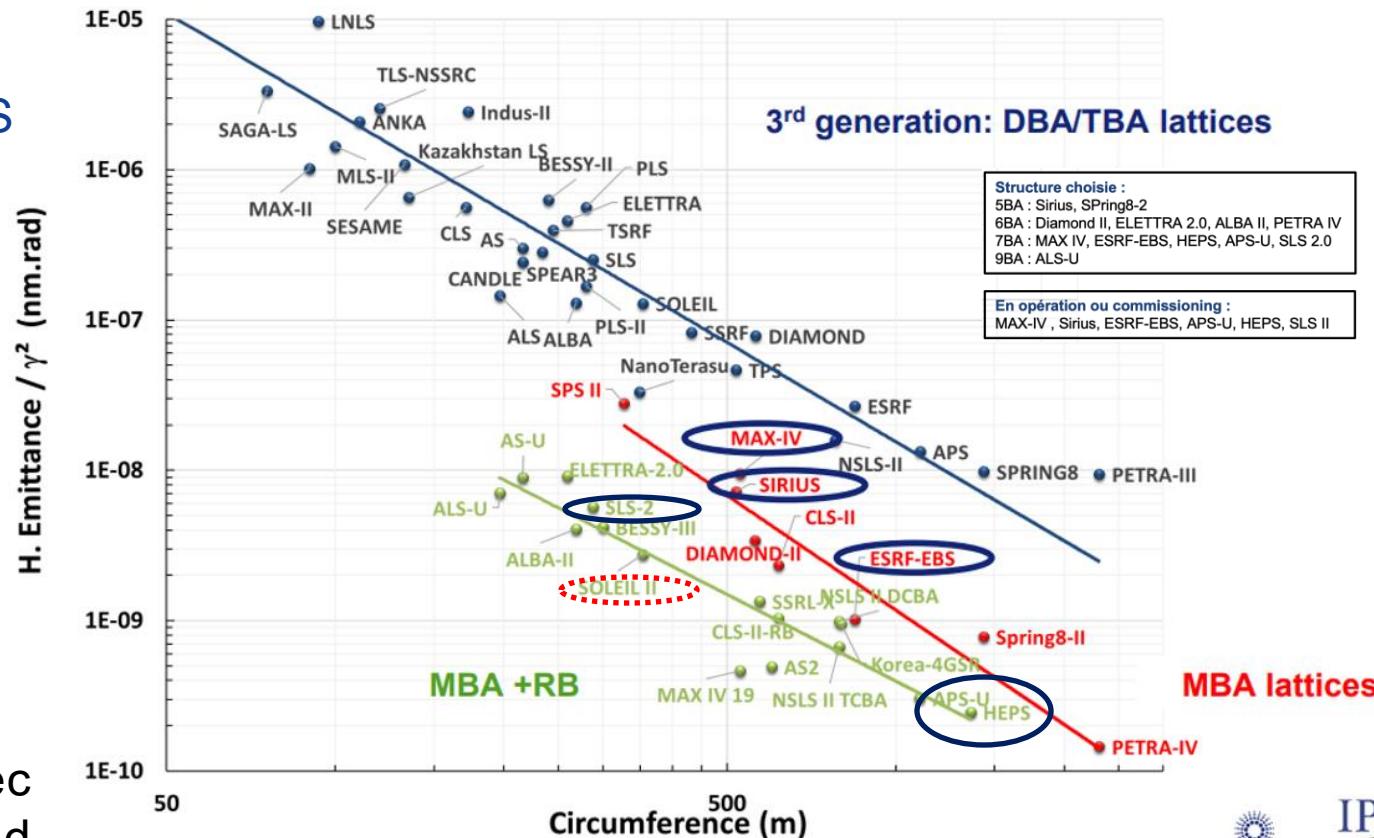


Pourquoi :

- 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.

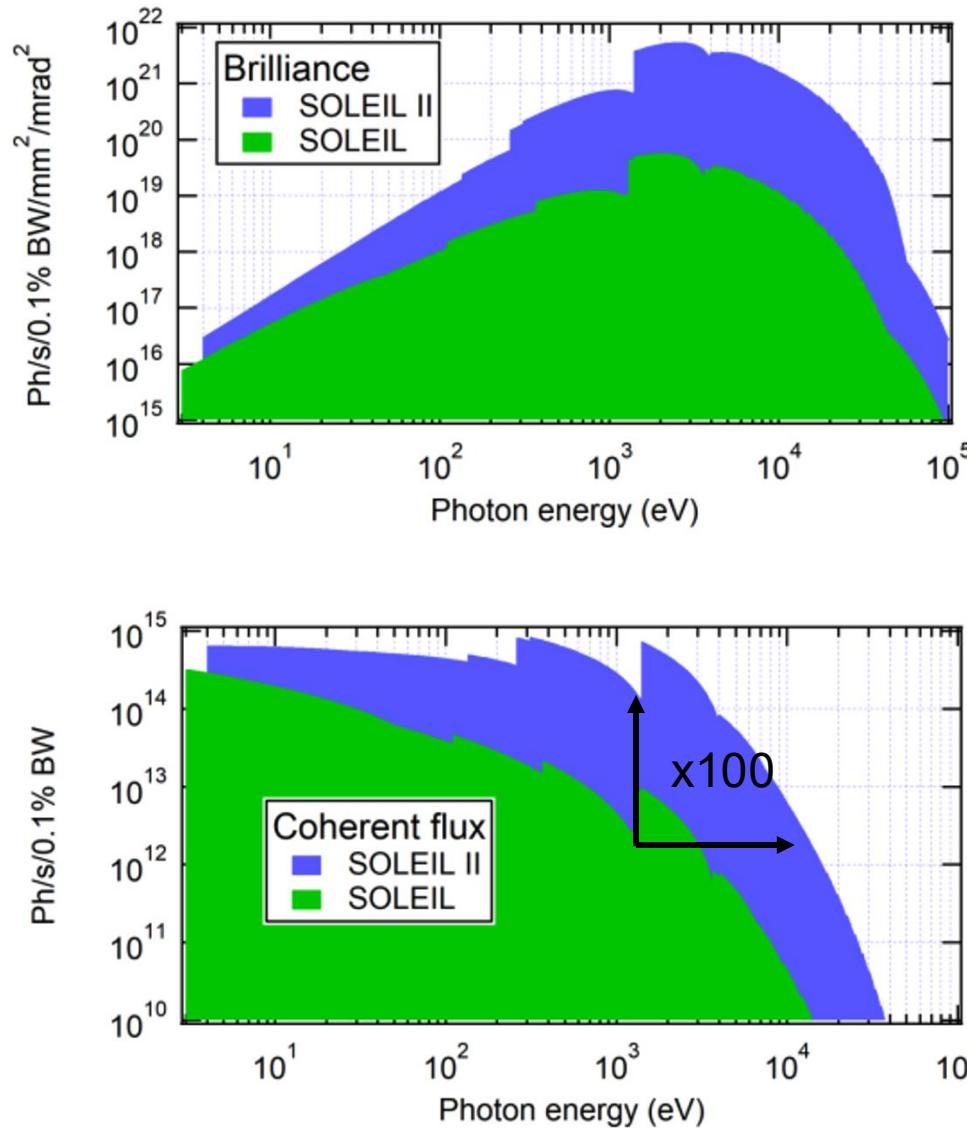


Lina Hoummi (ESRF, IPAC'23)

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

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

Fraction de flux cohérent



Paramètres	SOLEIL	SOLEIL II
Énergie [GeV]	2,75	2,75
Circonference [m]	354,10	353,98
Courant de faisceau maximal [mA]	500	500
Type de Maille	DBA	7BA-4BA
Nombre de Cellules	24	20
Emittance Naturelle [pm.rad] Faisceau Rond (100% couplage)	3 900 -	90 54
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

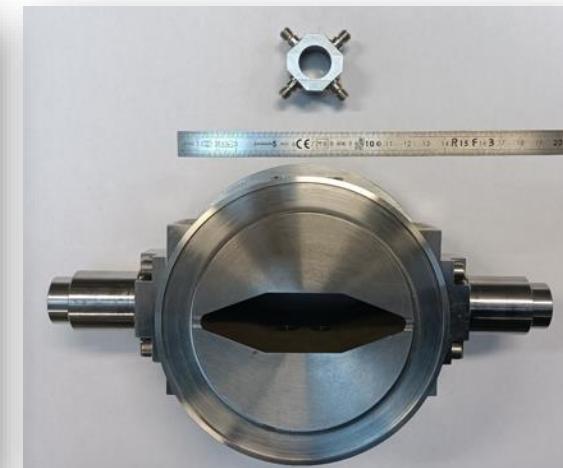
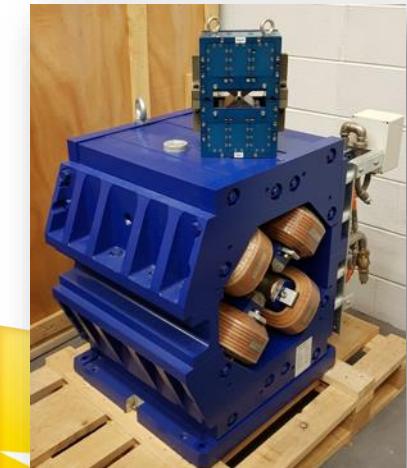
Paramètres sans insertions et sans cavités harmoniques
7 superbend à 2.92 T et 5 à 1.7 T

1. Maille MBA non standard : $12 \times 7\text{BA} + 8 \times 4\text{BA}$ / 2.75 GeV / 354 m.
2. $\sim 90 \text{ pm.rad}$ ($\sim 65 \text{ pm.rad}$ with avec insertion et faisceau rond [but ultime]).
3. « 22 » section droites (7 longueurs différentes).
4. Domaine spectrale 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

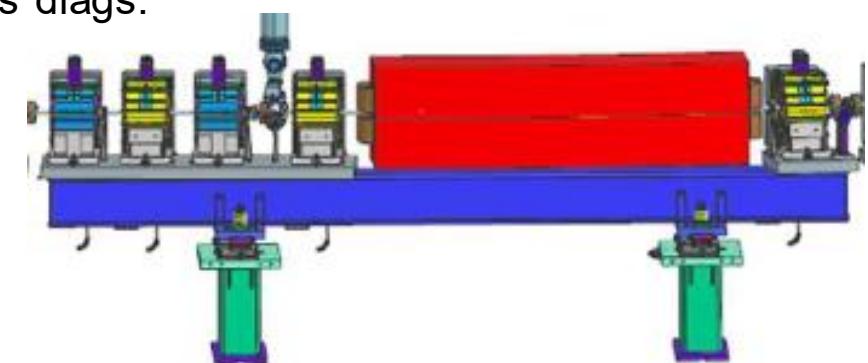
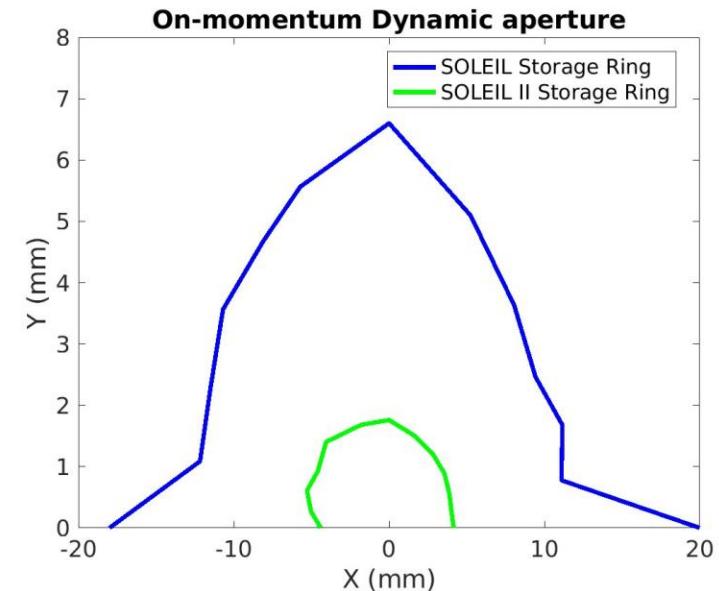
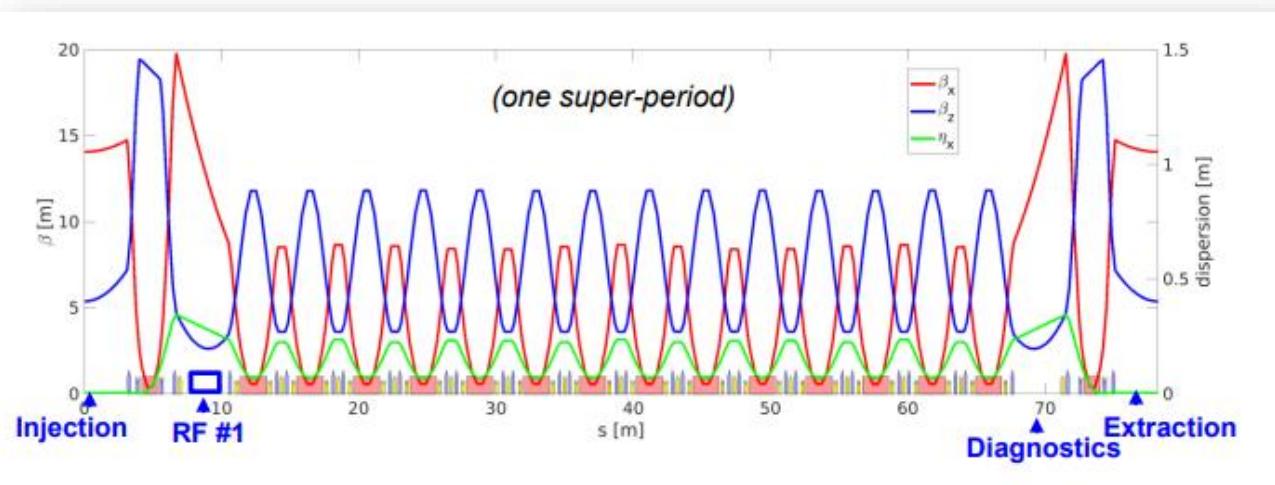
Un Nouveau Booster Faible Émittance pour SOLEIL II

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



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

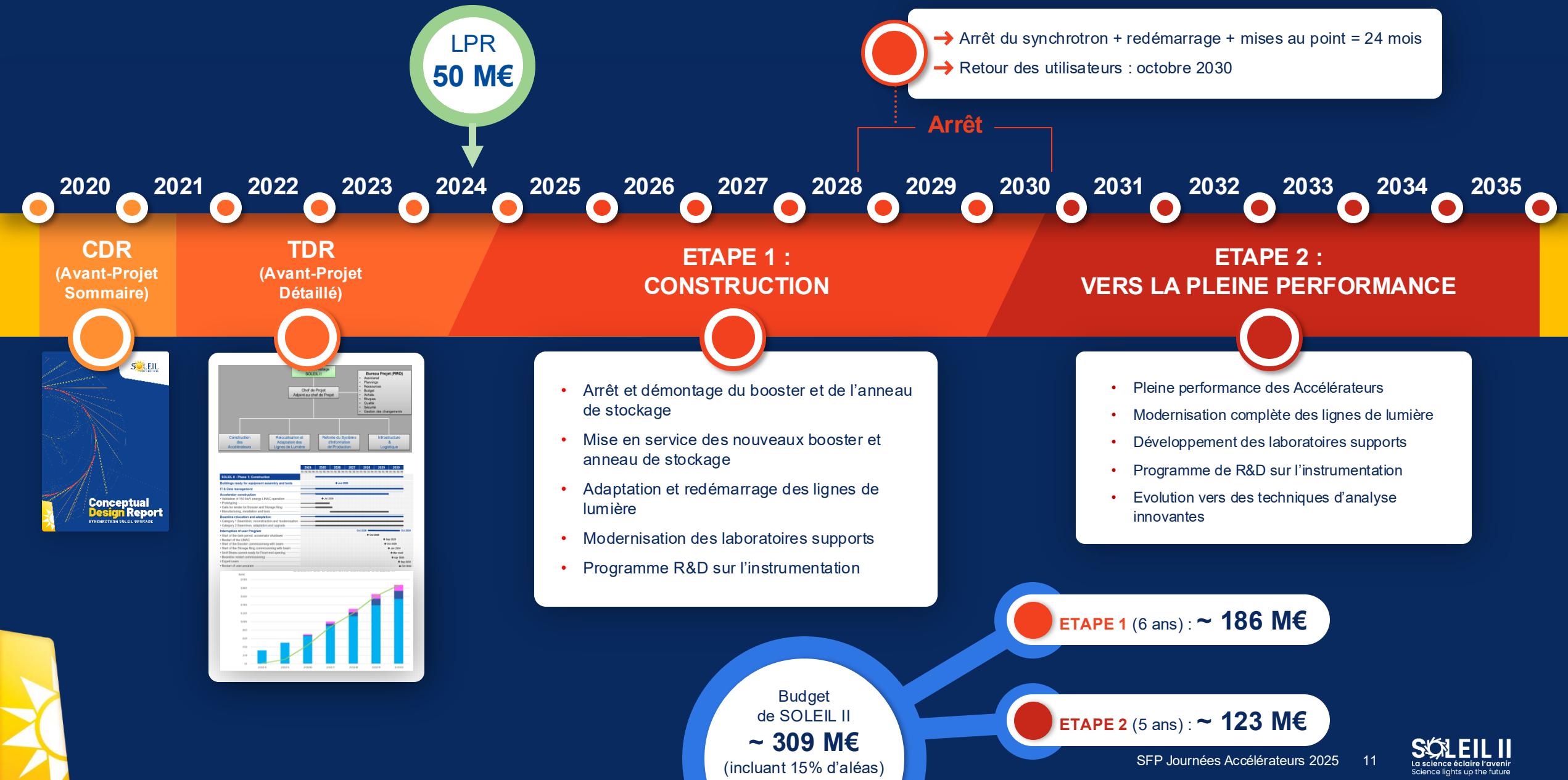
En présence de
Philippe BAPTISTE
Ministre chargé de l'Enseignement supérieur
et de la Recherche

Antoine PETIT
Président-directeur général
du CNRS

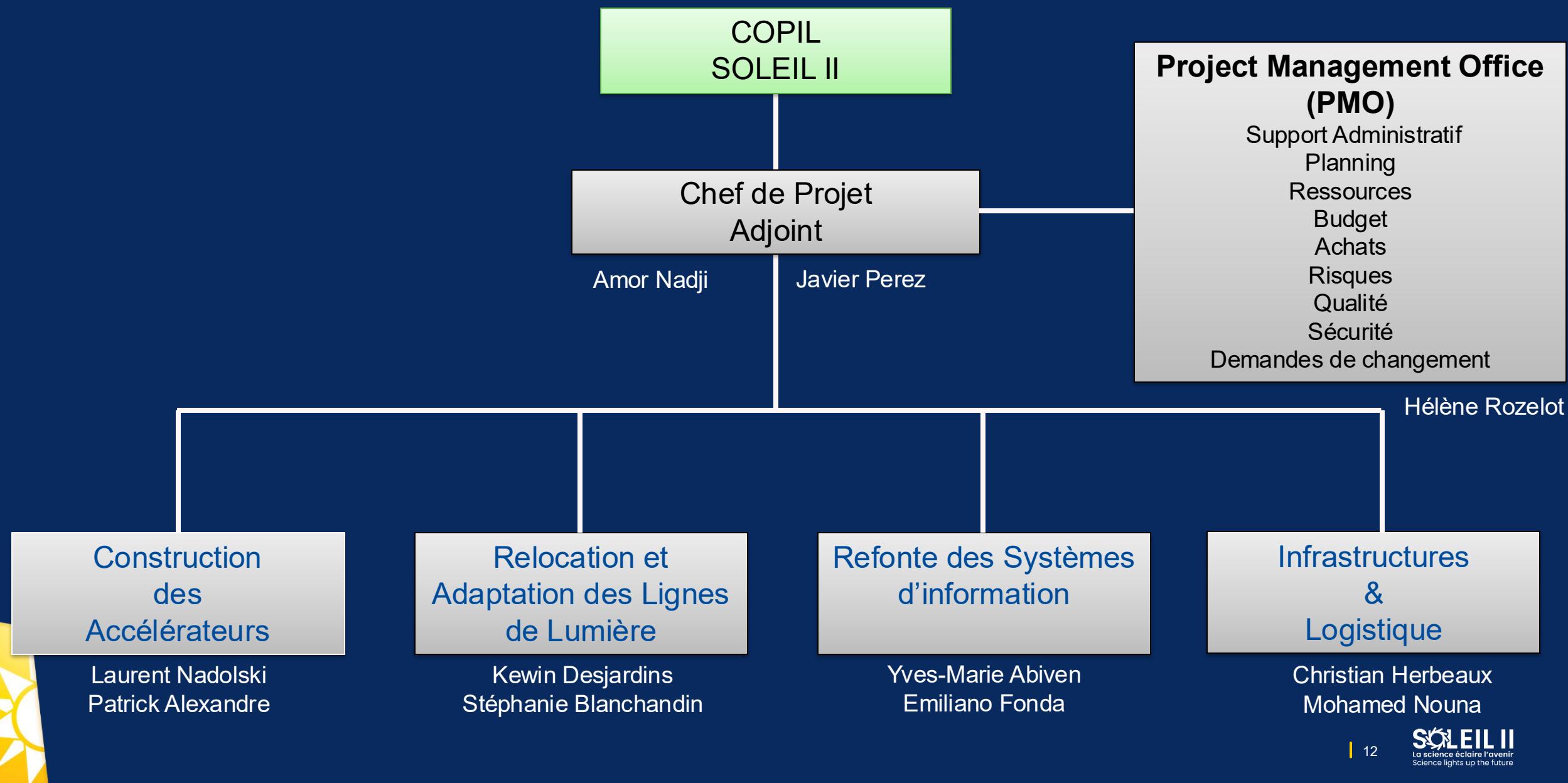
François JACQ
Administrateur général
du CEA

Vendredi 14 mars 2025 à 15 heures

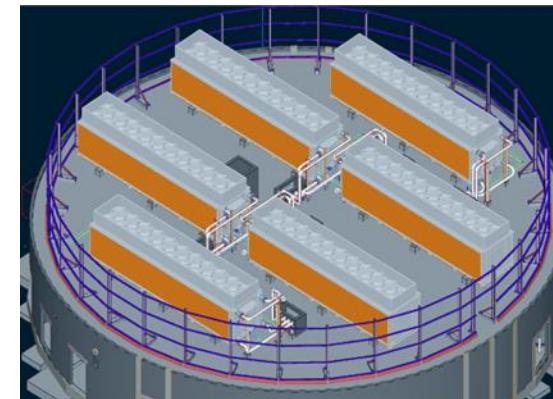




Organisation Générale du Projet SOLEIL II - Étape 1



Nouvelle Station de Refroidissement



- 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 :

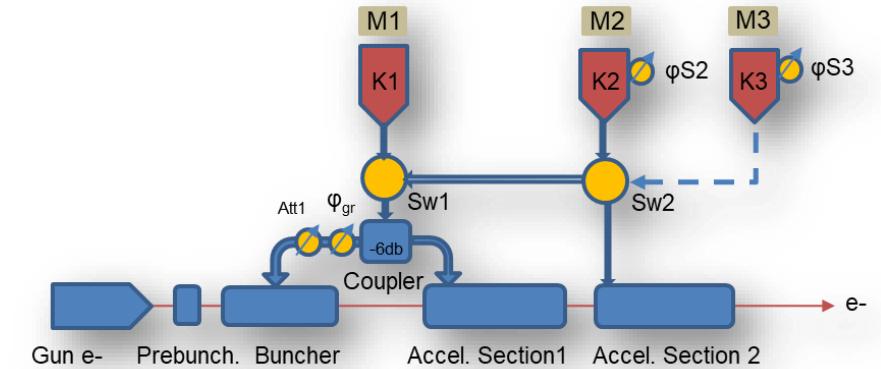
- 80 % d'économie d'eau
- 2 GWh d'économie d'électricité annuel

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.

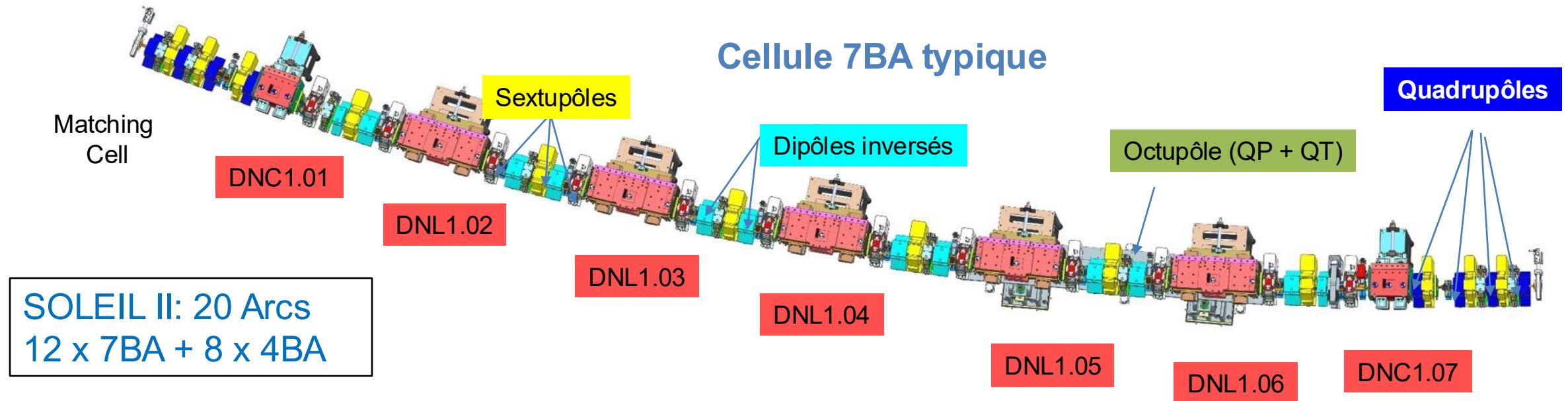


3^e modulateur à semi-conducteurs pour klystron et klystron

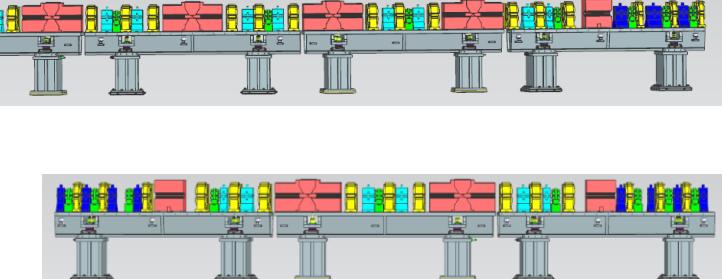
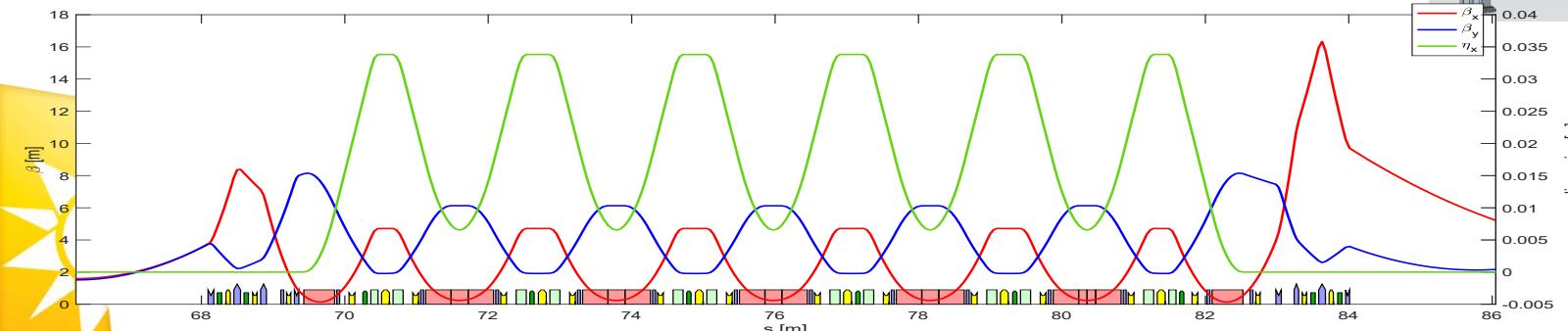


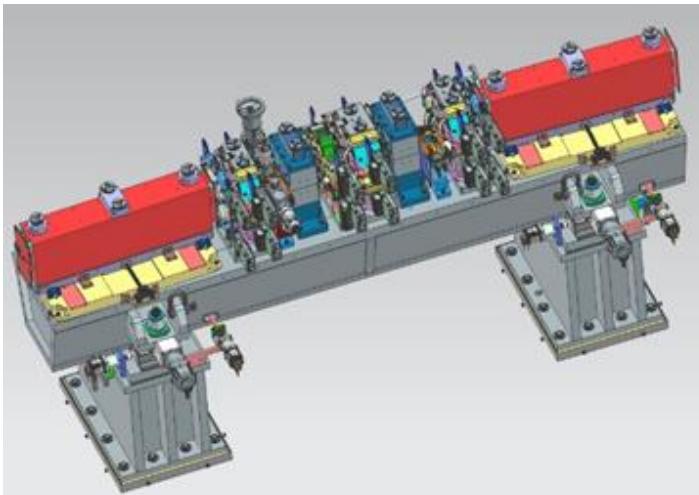
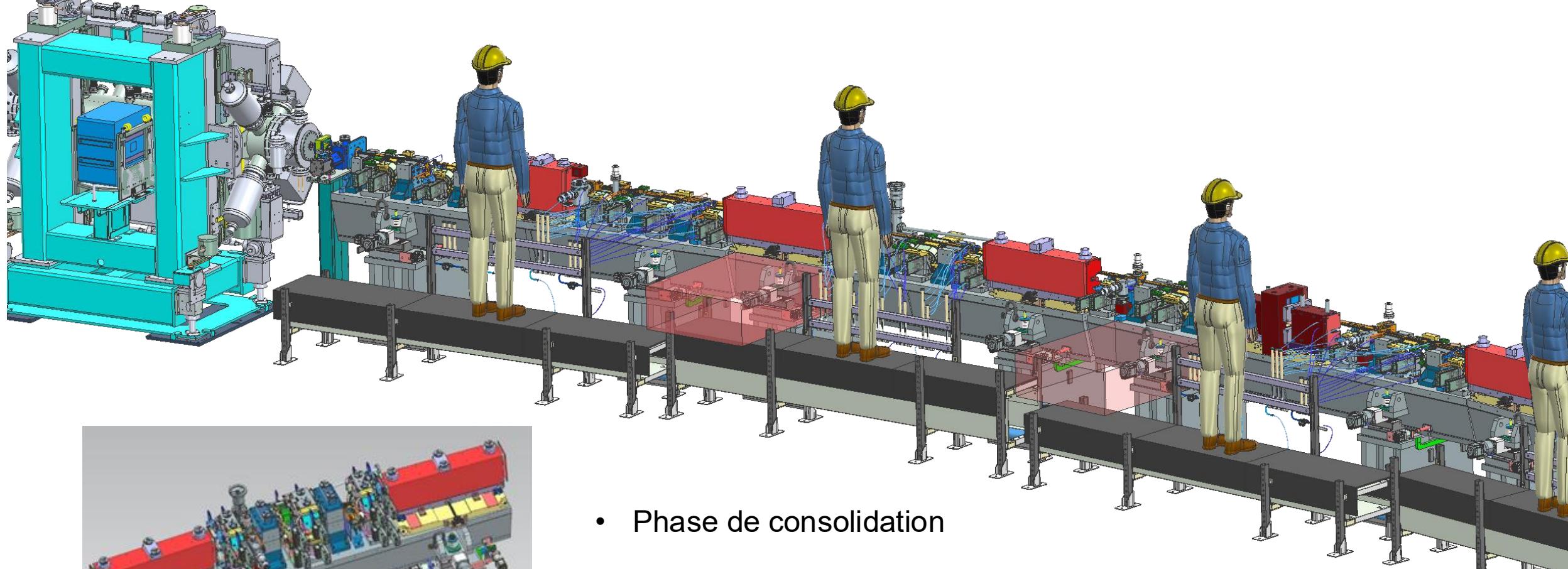
Le but est d'augmenter l'énergie du LINAC et de sa ligne de transfert à 150 MeV (au lieu de 110 MeV) en 2026 pour faciliter l'injection dans le nouveau booster à faible émittance de SOLEIL II.

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 ...)



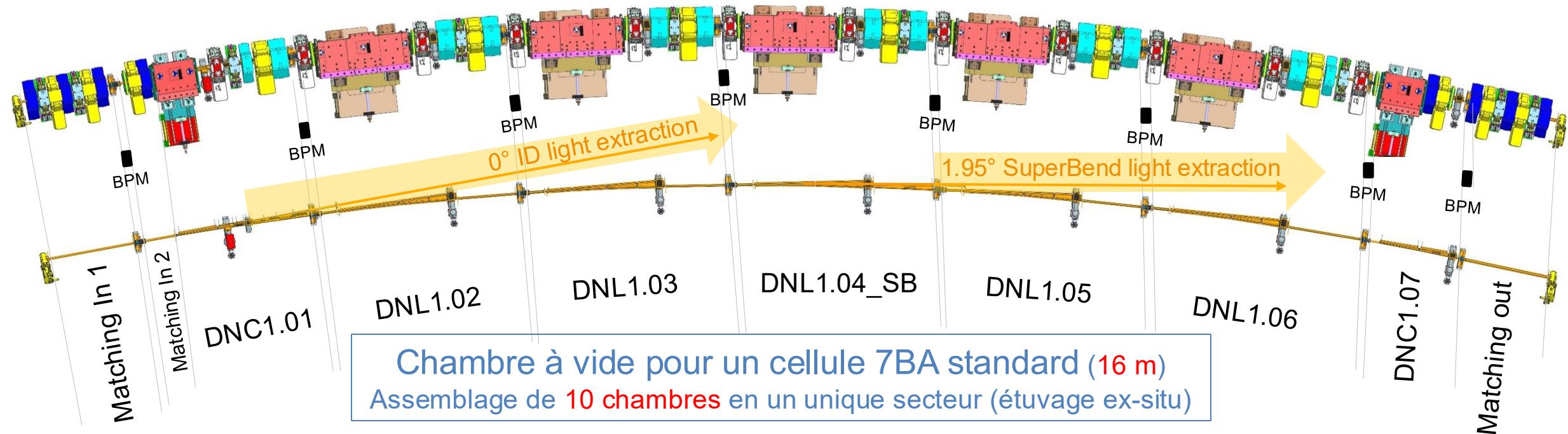
~103 fonctions d'aimants / 7BA



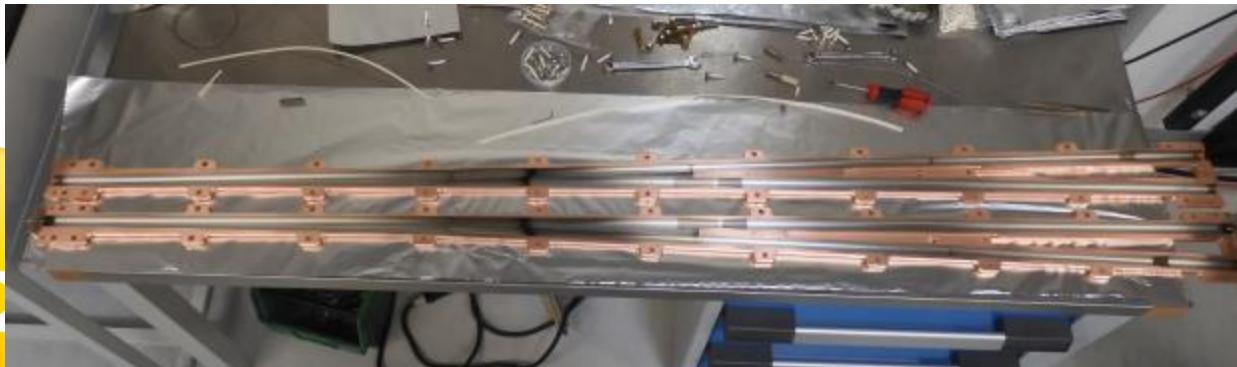


Exemple de poutre

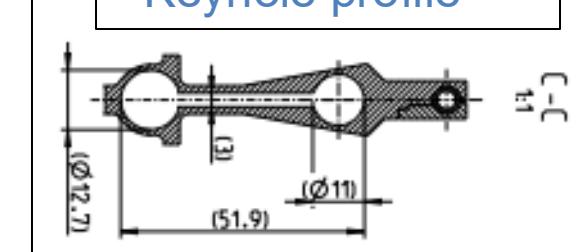
- Phase de consolidation
- Extractions particulières des lignes de lumière
- Identification des interfaces
- Préparation des appels d'offres



Prototypes de chambres dipôle reçus en 2024:



Chamber 3 mm gap
“Keyhole profile”



Matériaux :
Cu-OFS ou CuCrZr
avec dépôt de NEG

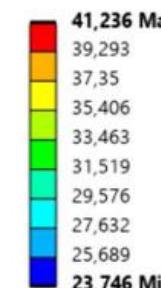
Marchés innovants



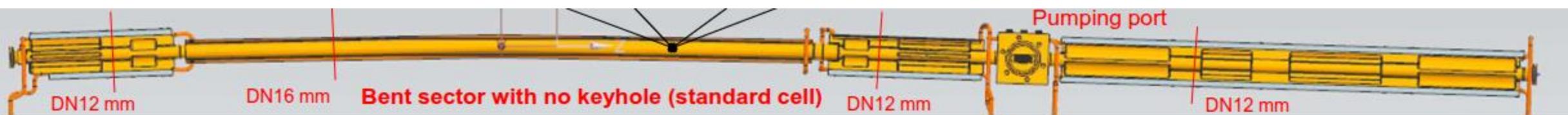
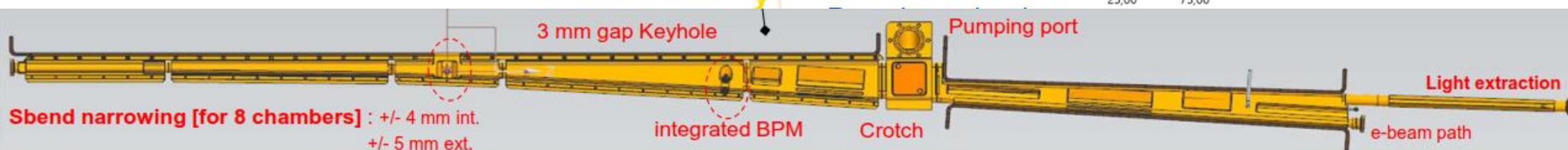
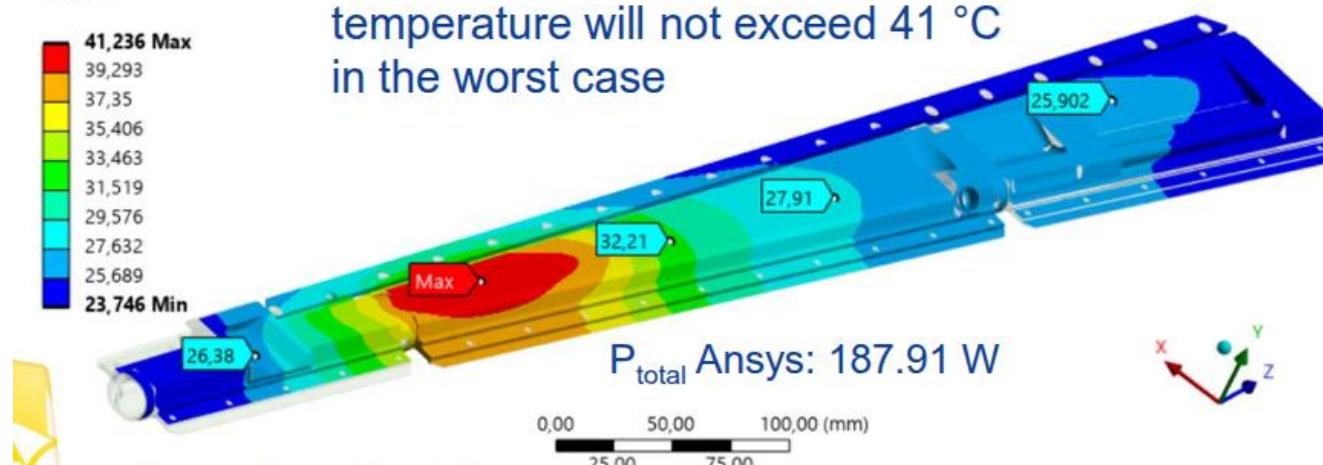
Plusieurs problématiques impactent le design des chambres à vides et sont difficiles à concilier :

- 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



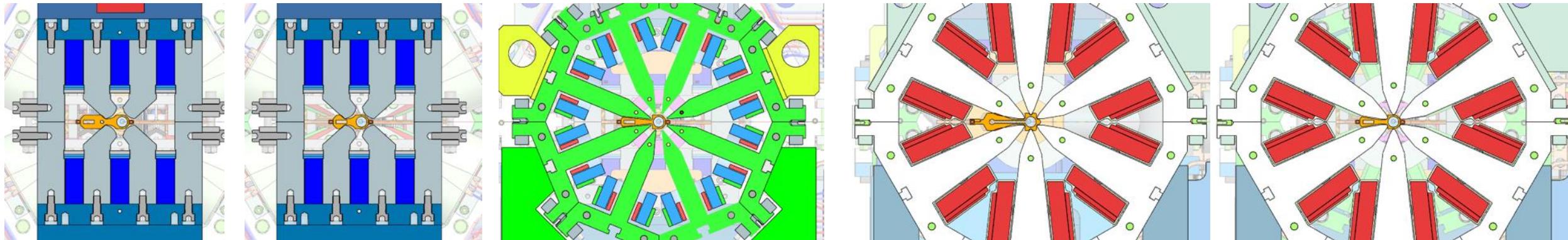
Vacuum chamber outer shell
temperature will not exceed 41 °C
in the worst case



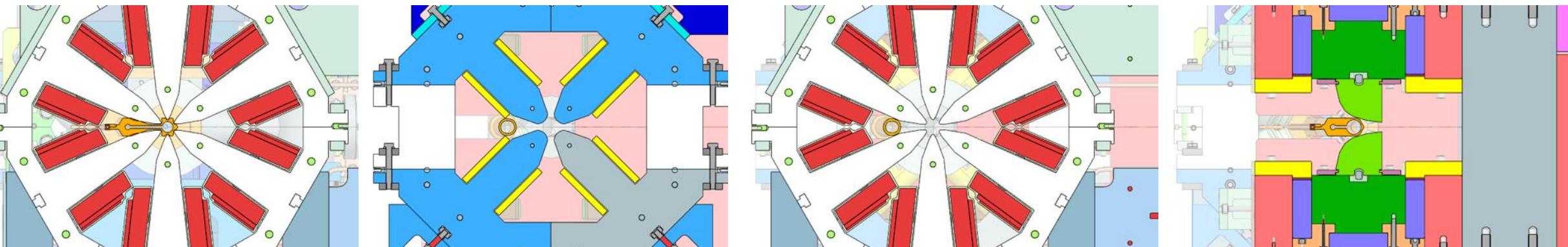
Canaux de
refroidissement

SOLEIL II : Interférences entre Chambres à Vide et Aimants

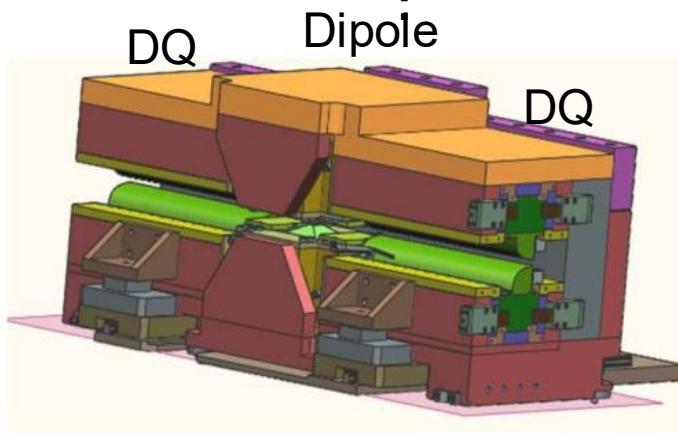
Une très grande variété d'aimants permanents et d'aimants électromagnétiques



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

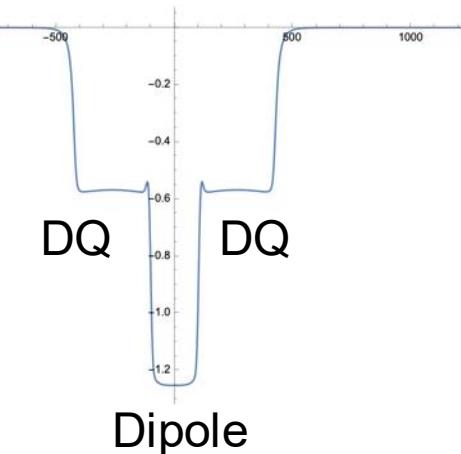


Phase de montage
de l'aimant
prototype



116 dipôles
196 dipôles inversé

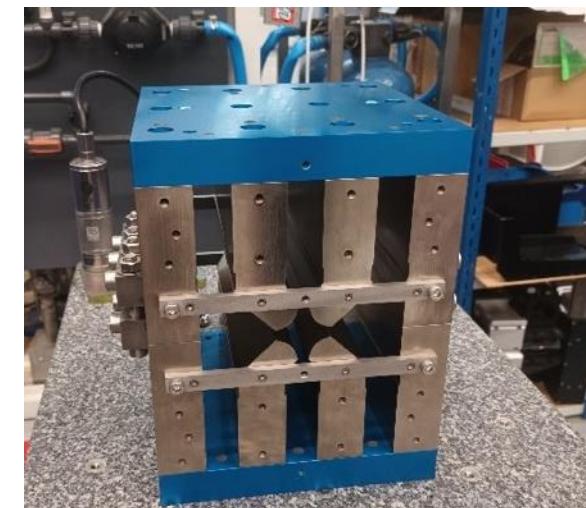
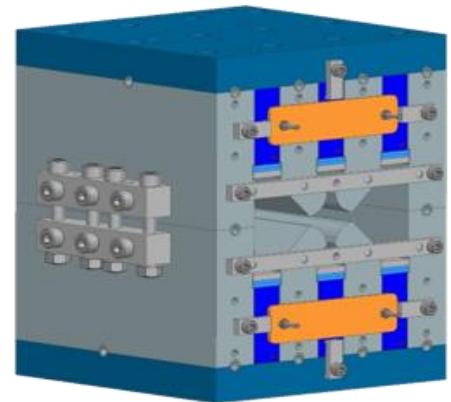
B-field [T]



Quadrupôle permanent :



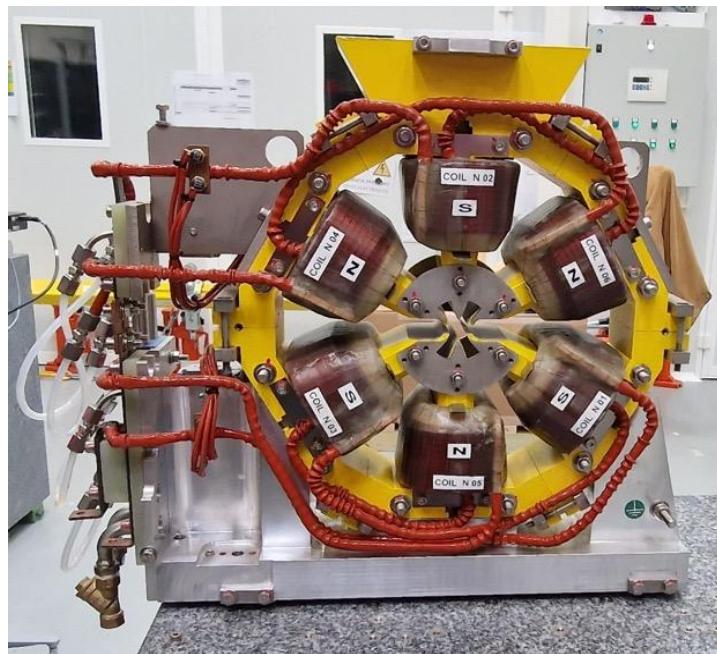
PRECIS-FIL



144 quadrupôles

Max gradient: 120 T/m
(SOLEIL: 20 T/m)

Prototype du sextupôle :

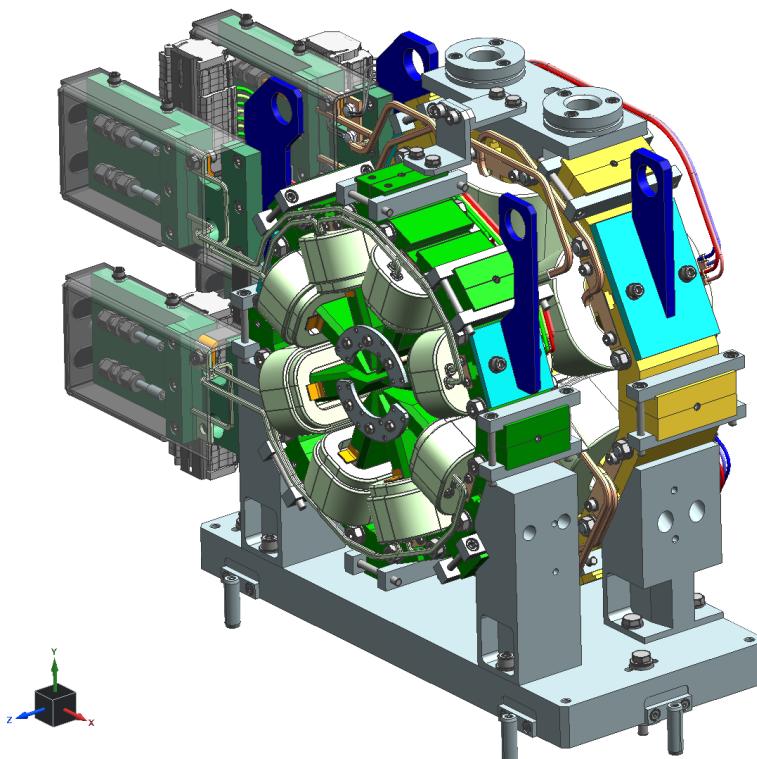


408 sextupôles

Jusqu'à 8500 T/m²

(SOLEIL : 320 T/m²)

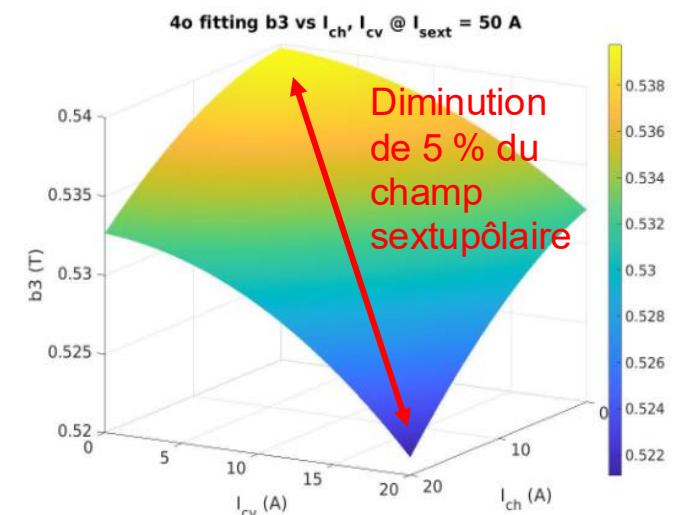
Afin de garantir un **alignement magnétique très précis** (de l'ordre de 10 µm) entre les **sextupôles et les quadrupôles de correction**, ces électroaimants seront montés sur une structure de support commune.



**Doublet
Sextupole-Octupole**

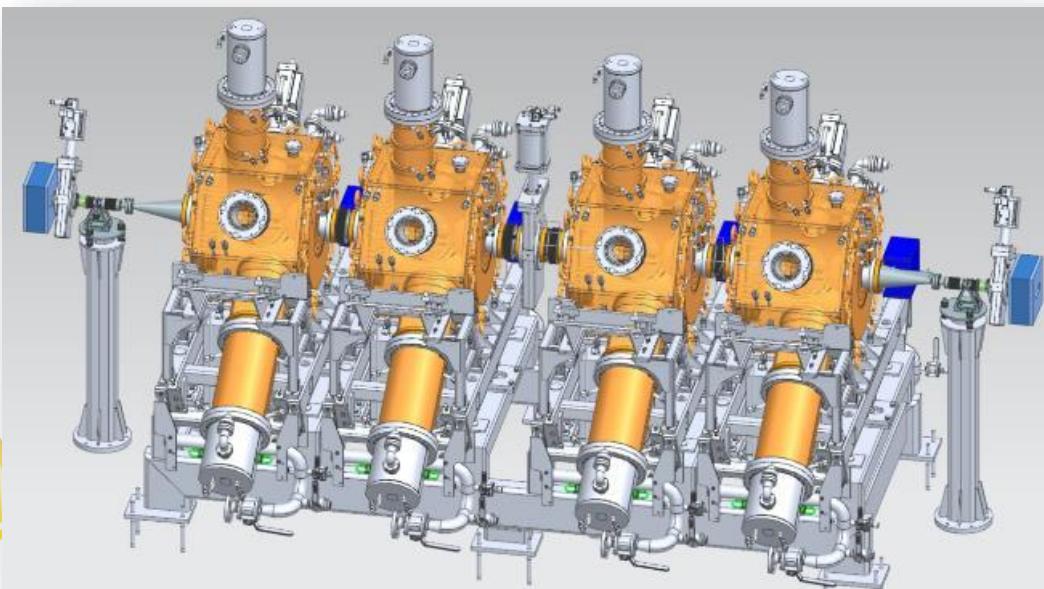
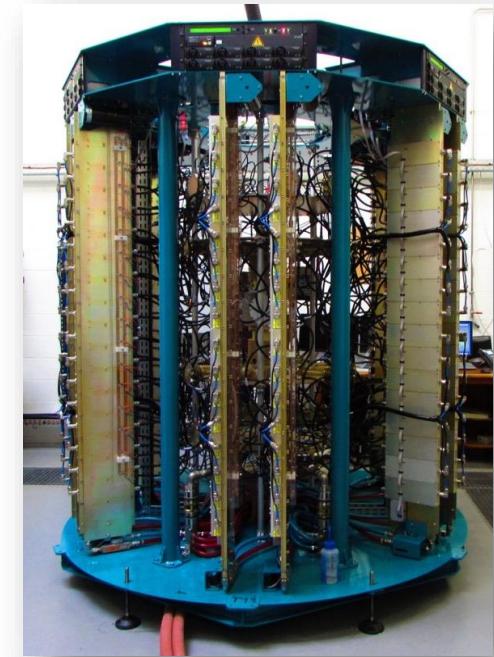
Le contrôle de ces électro-aimants sera particulièrement complexe :

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



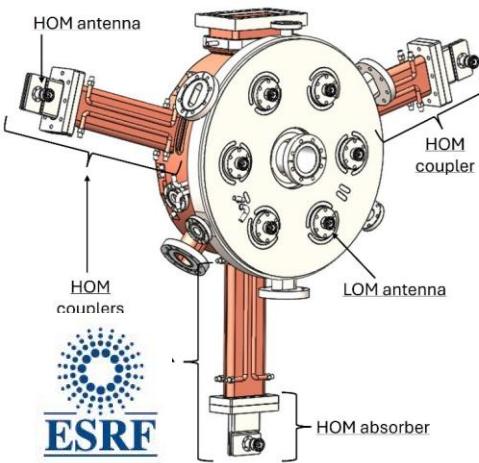
Mise à niveau des alimentation 352 MHz :

- 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.

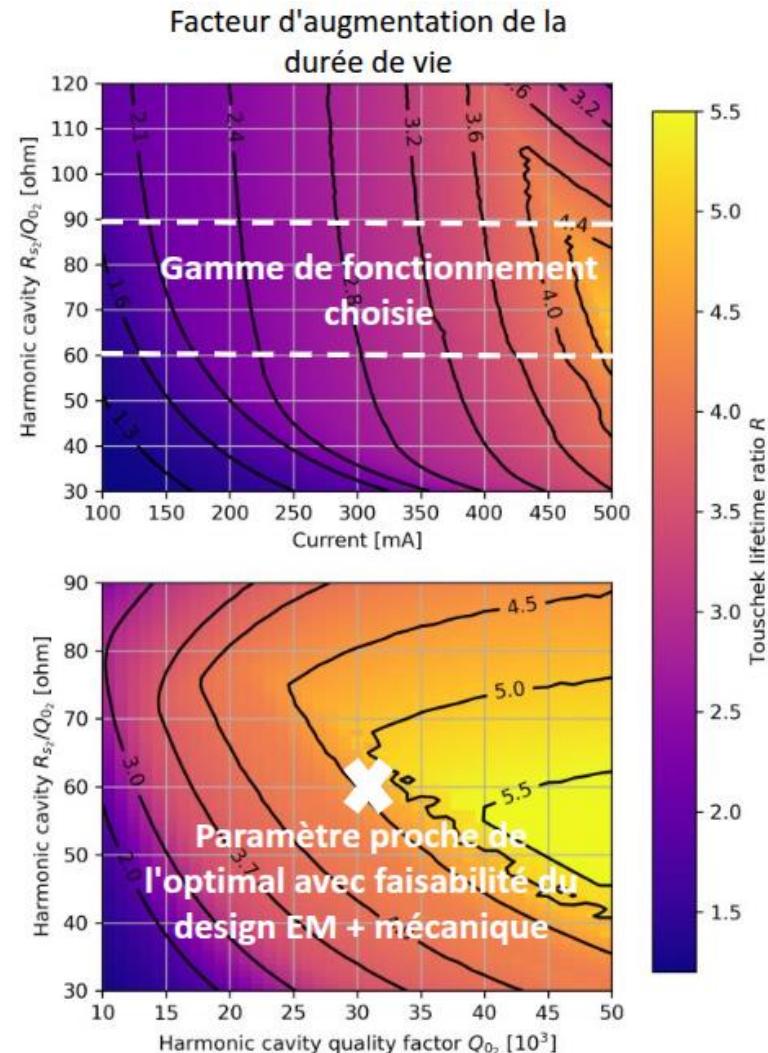


Les faisceaux de **très petites dimensions transverses** de SOLEIL II entraînent une **diminution drastique de la durée de vie** du faisceau de 20 h sur SOLEIL à 3 h sur SOLEIL II.

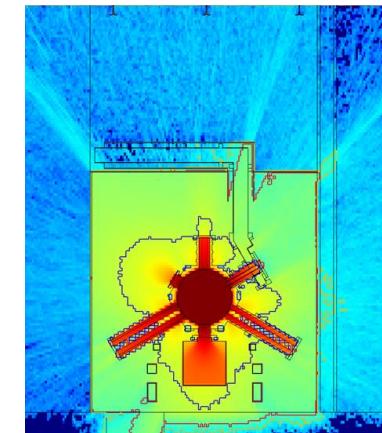
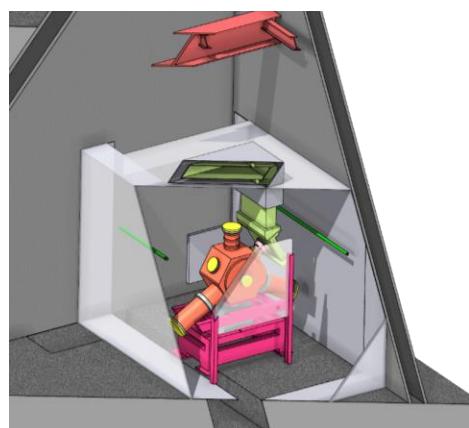
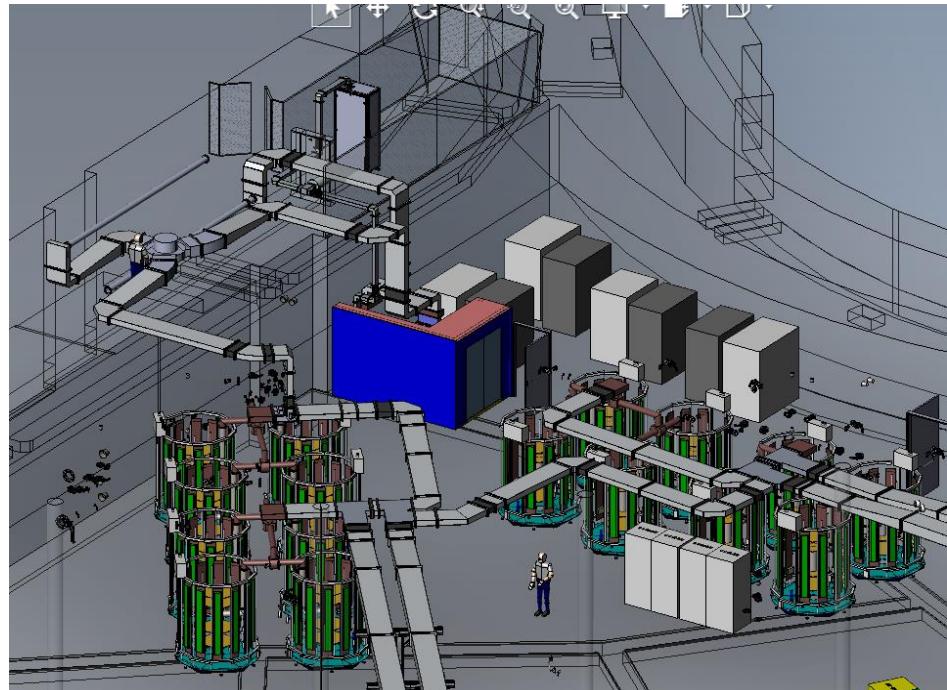
Une solution pour réduire ces effets est d'**allonger les paquets** en utilisant une **cavité harmonique**.

Cavité passive de 4ème harmonique (1,41 GHz) pour allonger les paquets dans SOLEIL II :

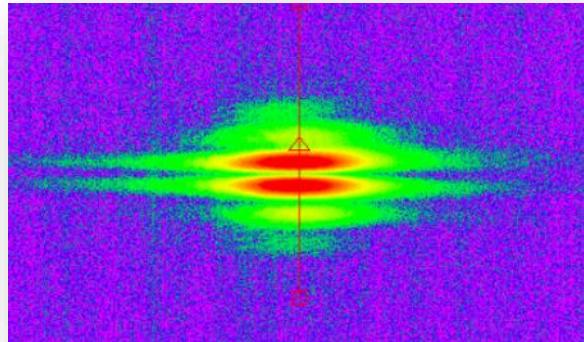
- **Augmentation de la durée de vie** Touschek d'un **facteur 3 à 4**.
- **Nouveau design innovant** réalisé par l'ESRF selon les besoins de SOLEIL II.
- **Faible R/Q = 29.6 Ω**, pour éviter les instabilités du faisceau.
- $V_{max} = 350$ kV
- $Q_0 = 31\,000$
- **TM020 utilisé en tant que en mode principal**.
- 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.

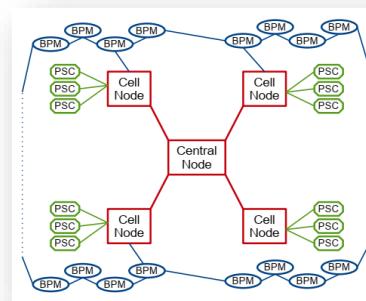


Premières mesures de la taille du faisceau en imagerie polarisée dans le visible !



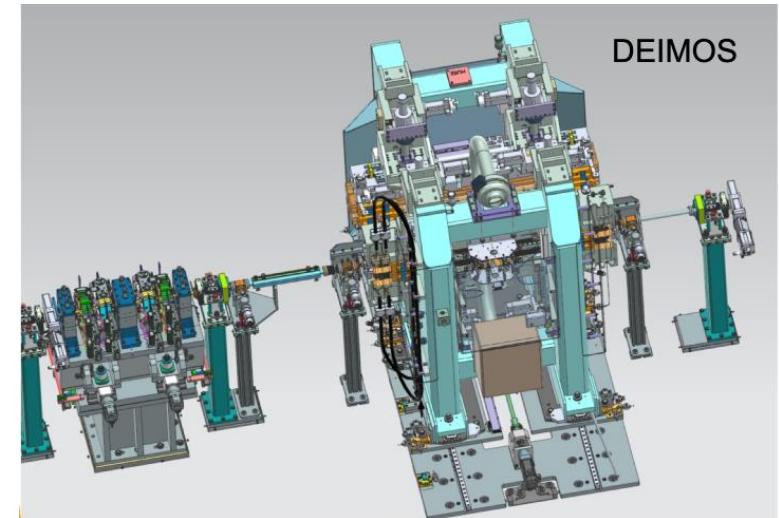
Développement et installation de la nouvelle architecture pour le Fast Orbit Feedback (FOFB) :

μTCA Plateforme (cell/central node):

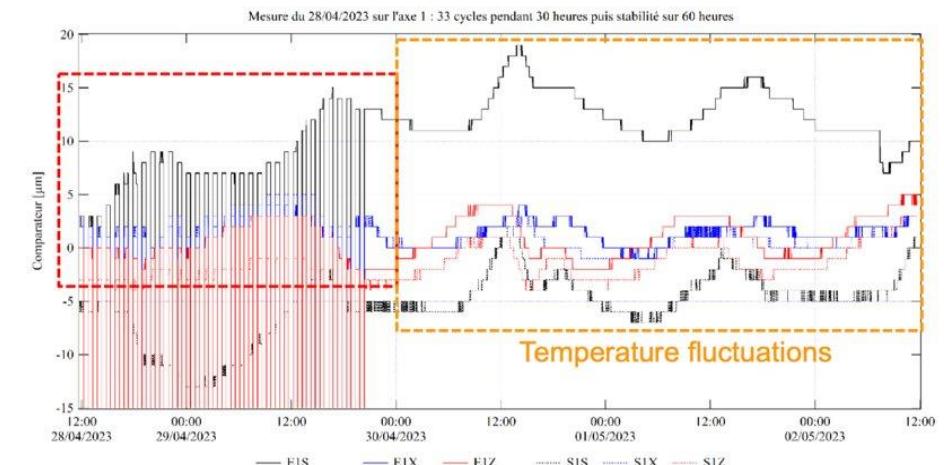


En production depuis début 2024

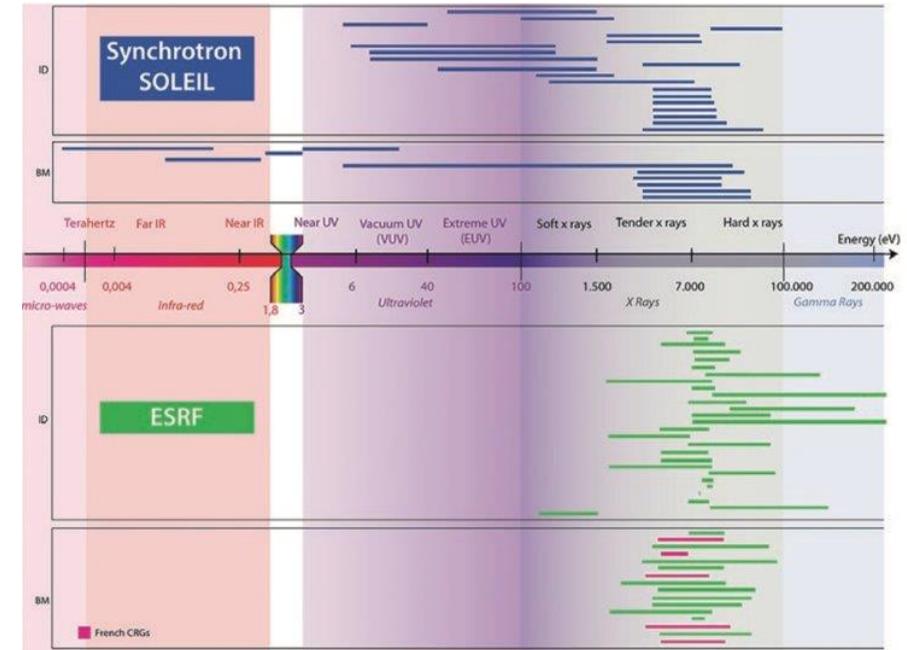
Validation de nouveaux concepts d'onduleurs.



Validation of the DUAL prototype



- **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 reçus** 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