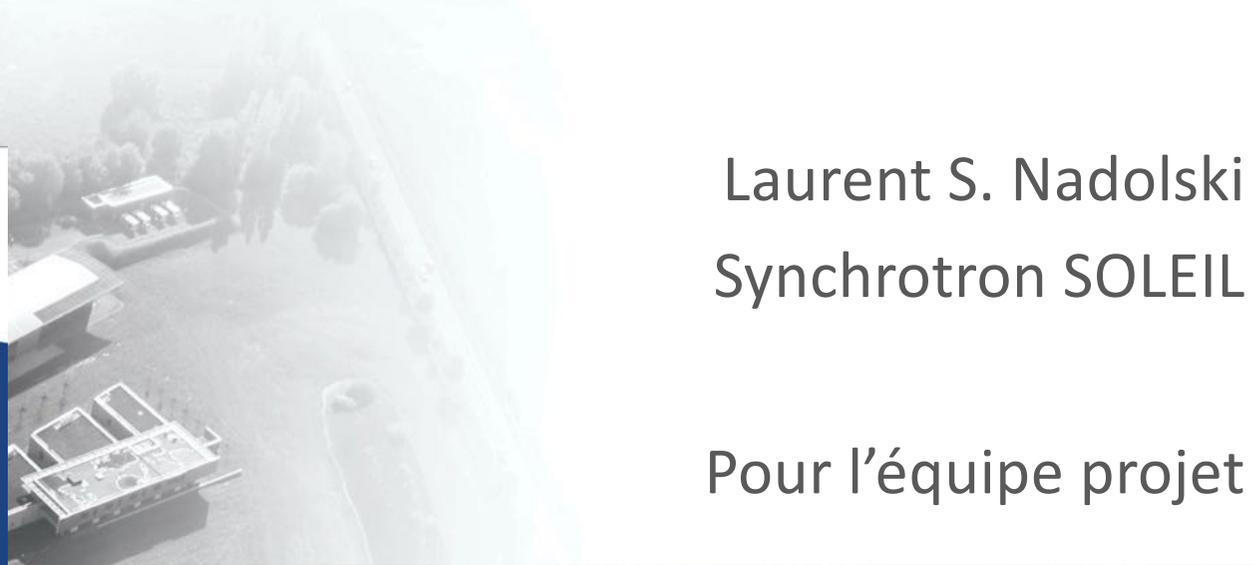
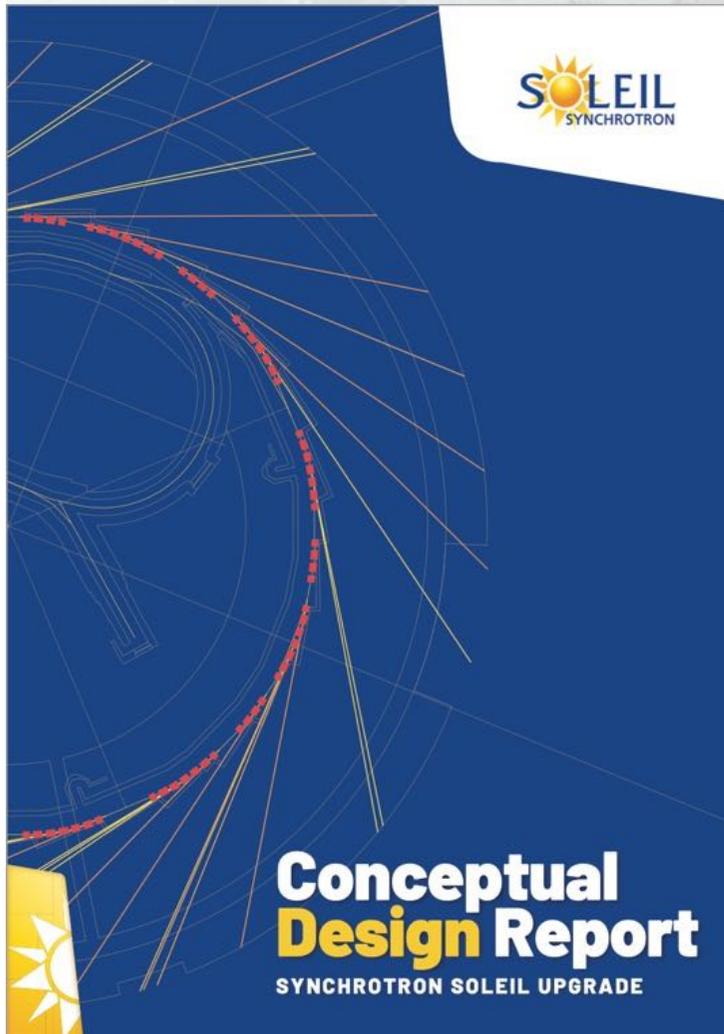


Présentation de la Phase d'Avant Projet Sommaire (APS) pour l'upgrade de SOLEIL

Laurent S. Nadolski
Synchrotron SOLEIL

Pour l'équipe projet



- Introduction
- Objectifs de l'upgrade
- Les nouveaux accélérateurs
- Les défis technologiques
- Planning et phases à venir



1^{er} faisceau : mai 2006

Circonférence : **354 m**

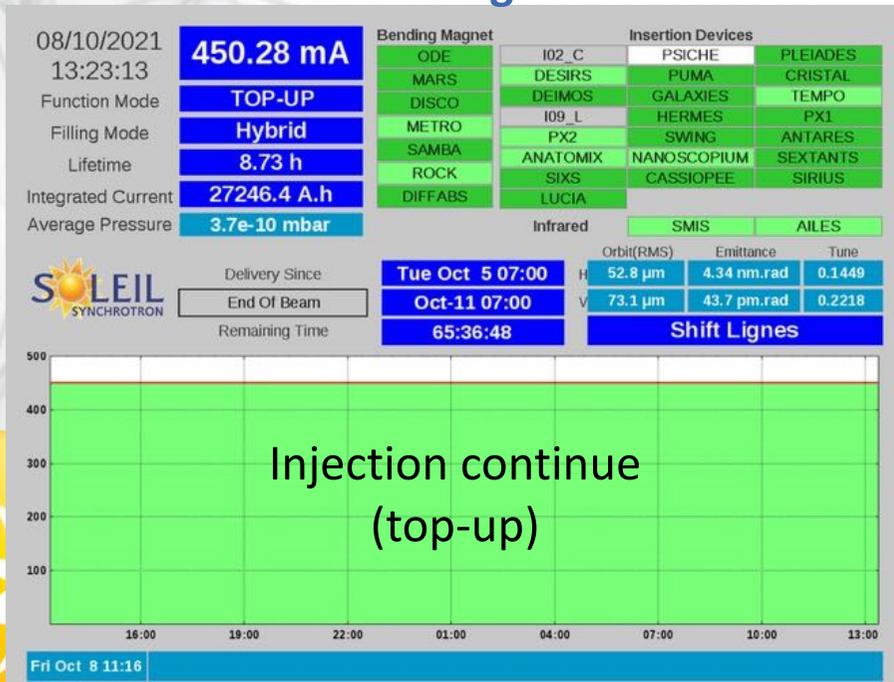
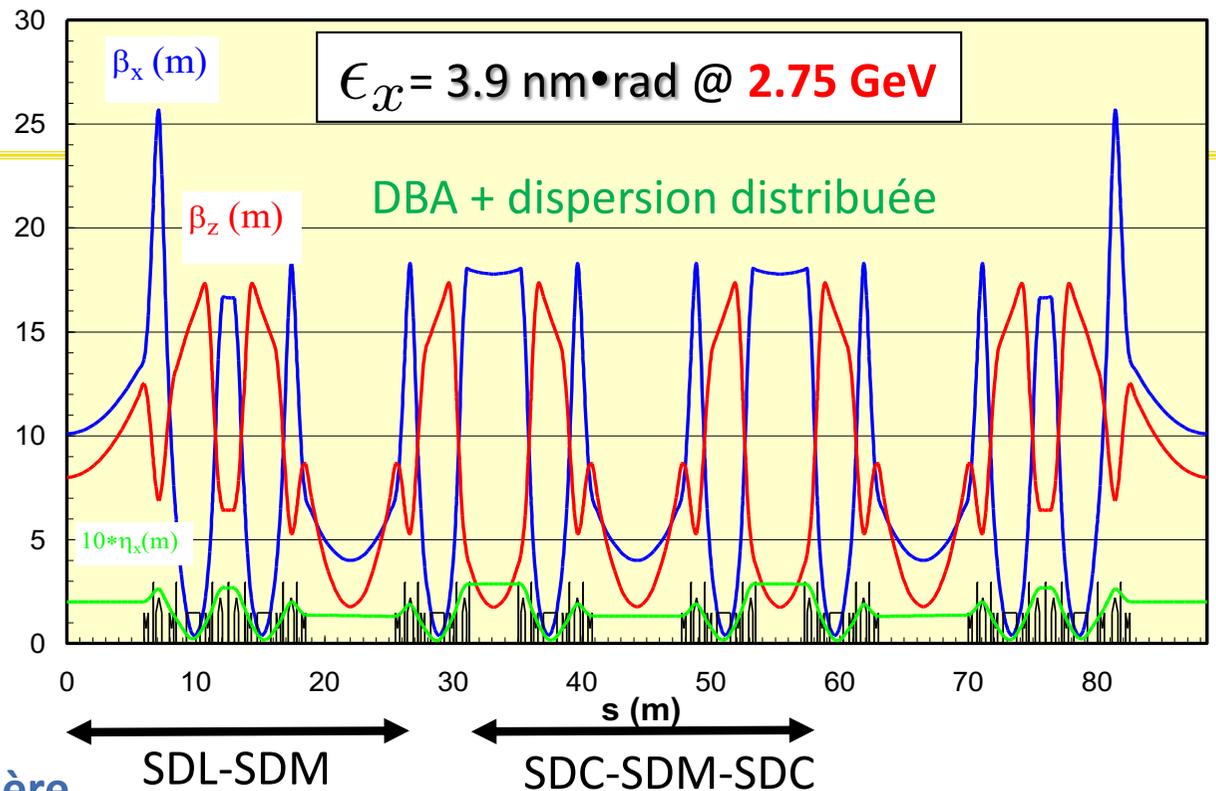
24 sections droites

SDL : 4 x **12 m**

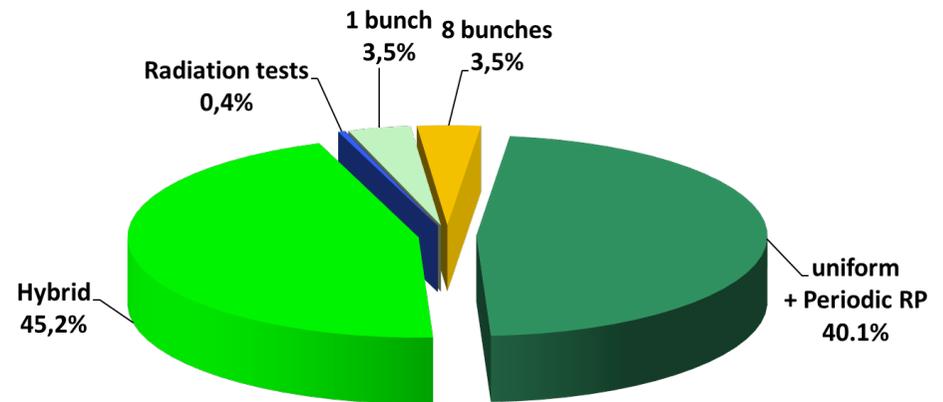
SDM : 12 x **7 m**

SDC : 8 x **3.6 m**

29 lignes de lumière



Beamline and radiation safety test (4096 hours)
Beam time according to filling patterns



5 modes de remplissage

Périmètre et Objectifs de l'Upgrade de SOLEIL

- Upgrade en **2 étapes de 5 ans** des accélérateurs, des lignes de lumière et de l'infrastructure, 20 ans après l'ouverture de SOLEIL ; maintien de la compétitivité de SOLEIL et **complémentarité avec l'ESRF-EBS**.
- **Répondre aux défis scientifiques** et sociétaux actuels et futurs en reconstruisant l'anneau de stockage avec une émittance record de 50 x 50 pm.rad, des faisceaux **100 fois plus brillants**, et en y adaptant les lignes de lumière.
- Accès en routine à l'**échelle nanométrique** et à la **dynamique des processus (in operando)** ; développement de méthodes entièrement nouvelles.
- Evolution des moyens informatiques en les centrant sur la donnée et poursuite de la **transformation numérique** de SOLEIL.
- **Préservation** autant que possible des **infrastructures actuelles** pour une optimisation des coûts ; remplacement des infrastructures vieillissantes pour minimiser l'empreinte environnementale ; réduction de moitié de la consommation énergétique de l'anneau de stockage.
- Tirer profit de l'effet de levier des collaborations européennes et valoriser l'innovation.



UPGRADE

Un grand mouvement mondial est en cours pour construire *les anneaux de stockage de la quatrième génération*, en baissant très significativement l'émittance horizontale ϵ_x du faisceau d'électrons :

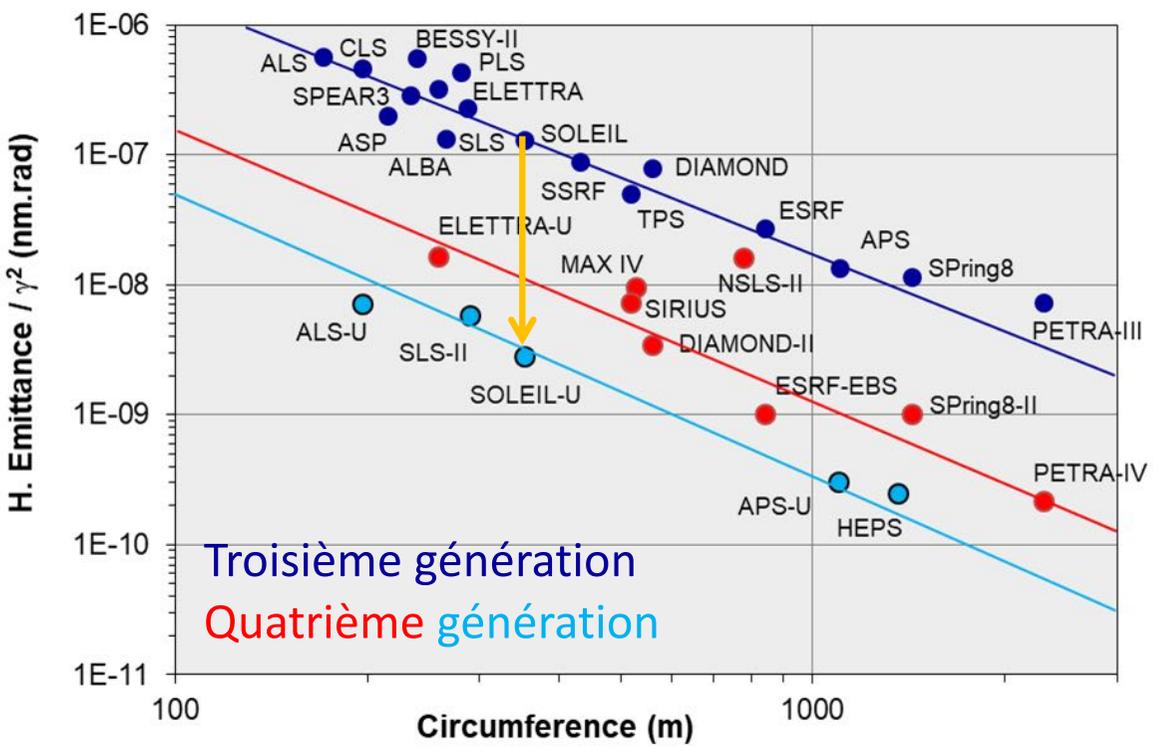
- Nouvelles sources : MAX-IV (Suède), SIRIUS (Brésil)
- Upgrade : ESRF-EBS (Grenoble)

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

E : Energie d'électrons
 N : Nombre des dipôles

Structure magnétique de type
Multi-bend Achromat ($N > 3$)

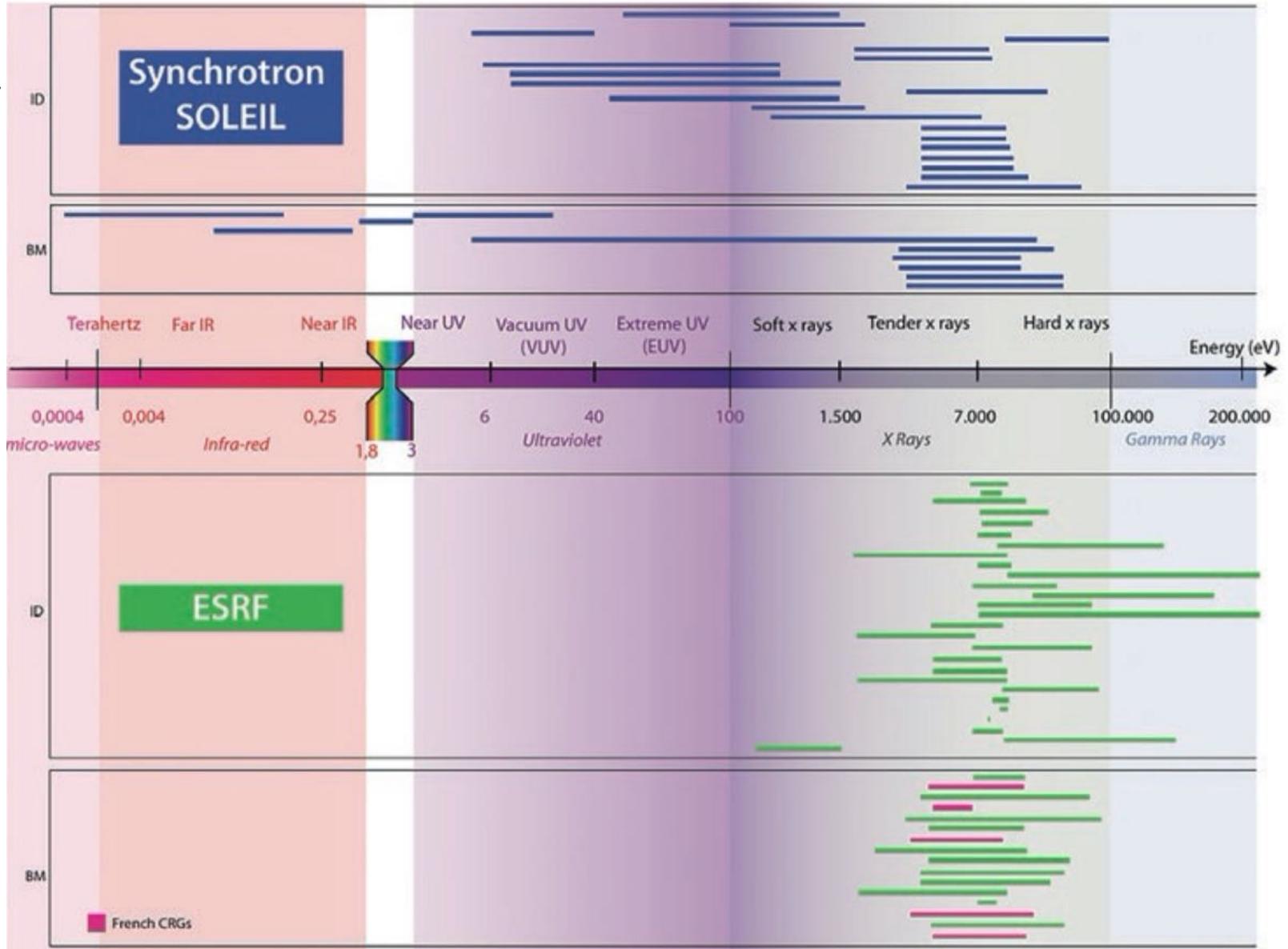
Facility	Energy (GeV)	ϵ (pm.rad)	Lattice	Status	Shutdown
ESRF-EBS (EU)	6 (844m)	140	7BA	Open	2019-20
APS-U (USA)	6 (1104m)	42	7BA	Under Const.	2022-23
SLS-II (CH)	2.7 (290m)	160	7BA	TDR	2023-24
ALS-U (USA)	2 (197m)	109	9BA	TDR	2024-25
ELETTRA (I)	2 (259m)	250	6BA	TDR	2025-26
Diamond-II (UK)	3.5 (562m)	150	7BA	TDR (CD1)	2025-26
PETRA-IV (D)	6 (2304m)	30	7BA	TDR	2025-26
SOLEIL (F)	2.75 (354m)	80	7BA-4BA	CDR	2027-28
SPring-8-II (Japan)	6 (1435m)	140	5BA	Study	
SSRF-U (China)	3 (432m)	203	7BA	Study	



Complémentarité SOLEIL/ESRF

Domaine spectral très large : 10 ordres de grandeur

2.75 GeV
354 m



6 GeV
844 m



UPGRADE



Matériaux avancés

Matériaux quantiques
Ingénierie des matériaux



Combinaison de techniques spectroscopiques et structurales –
nm, >mV, >50 mK, > 10ps



Qubits, Ordinateur quantique



Energies renouvelables

Production
Conversion et stockage
Impact environnemental et économie circulaire



Résolution spatiale (quelques nm), évolution de l'état chimique
et des propriétés physique, *in situ, operando*



Conversion de biomasse, Photovoltaïque



Biologie et Santé

Pathogènes (ré)émergeants dans leur environnement
Besoin de diagnostic Clinique rapide
Santé et maladie des plantes – alimentation, changement
climatique



Procédures innovantes de préparation d'échantillons pour les
expériences multimodales, les cellules vivantes, les tissus, les
petits organismes, l'imagerie haute résolution avec la
tomographie CryoEM, CryoET et Soft Xray



Bactéries multi-résistantes



Terre et Environnement

Atmosphère et réchauffement climatique
Surface de la Terre, pollution



Spéciation chimique dans des systèmes interfaciaux complexes,
sensibilité chimique à haute résolution spatiale, analyse multi-
échelles des transferts de polluants, détection des ultra-oligo-
éléments.



Réchauffement climatique, Dépollution



EXPÉRIENCES JUSQU'À
10 000 FOIS PLUS RAPIDES



RÉSOLUTION À L'ÉCHELLE
NANOMÉTRIQUE

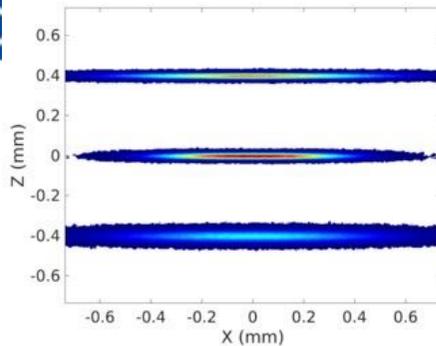


EXPÉRIENCES JUSQU'À
1 000 FOIS PLUS SENSIBLES

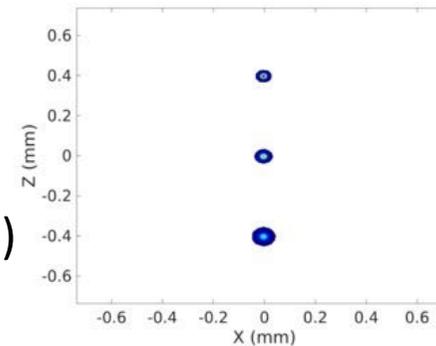


ETUDE DE DISPOSITIFS
EN CONDITIONS RÉELLES
DE FONCTIONNEMENT

De Nombreuses Conditions aux Limites Des Spécificités à Conserver



Faisceau
Sections droites
Réduction x100 (H)

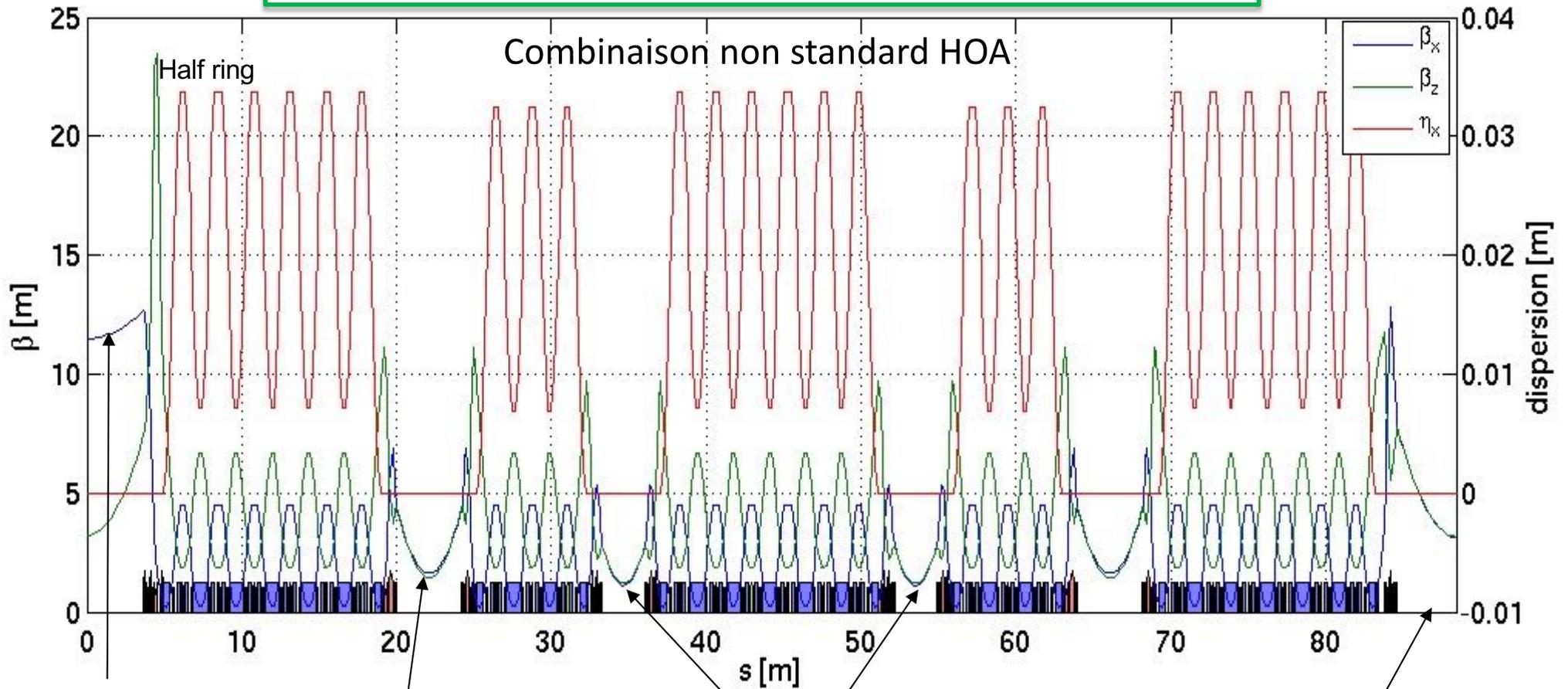


SOLEIL/upgrade

- Conserver la gamme spectrale (**10 ordres de grandeur**)
- **Maximiser l'intensité du flux de photons cohérents** : la plus haute brillance et la plus grande cohérence transverses possibles
 - **Emittance des électrons proche de l'émittance photon émis par un électron unique pour les rayons X mous et tendres (jusqu'à 4 keV)**
 - émittance ~**50 pm.rad** dans les 2 plans transverses
 - émittance naturelle horizontale < **100 pm.rad**
 - **adaptation des ellipses / onduleurs optimisés** pour la faible émittance
- **Préserver** le courant de **500 mA** en mode uniforme (2.75 GeV)
- **Réutiliser le tunnel existant, les infrastructures techniques et maintenir les points sources** des lignes de lumière
- Fournir des sources alternatives de rayonnement sur dipôles (4 x superbend 3 T) **et** des extractions pour le rayonnement **IR et VUV**
- **Minimiser les déplacements** des points sources des lignes de lumière
- Préserver la position de la ligne **MARS (échantillons radioactifs)** et les lignes longues cantés ANATOMIX et NANOSCOPIUM (**150/200m**)
- **Préserver** des modes en structure temporelle

Maille de référence (V0313)

80 pm.rad 2.75 GeV 354 m 7BA - 4BA



Injection
 $\beta_x \sim 11 \text{ m}$
 $L = 7.35 \text{ m}$

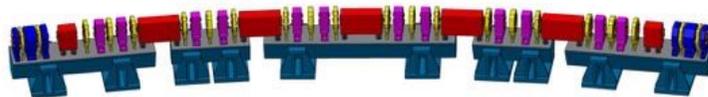
$\beta \sim 1.5 \text{ m}$
 $L = 4.150 \text{ m}$

$\beta \sim 1.1 \text{ m}$
 $L = 2.730 \text{ m}$

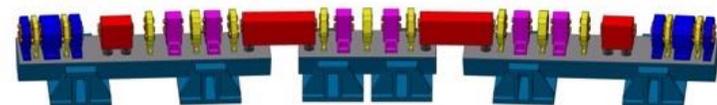
$L = 7.65 \text{ m}$
 Chicane and
 quadrupole triplet to
 be added



7 BA



4 BA





UPGRADE

Paramètres clefs

Ouverture dynamique

Durée de vie

Facteur de compression des moments

Allongement des paquets

Cavités harmoniques



Lattice	Unit	CDR lattice upgrade	Current lattice
Symmetry		2	1
Energy	(GeV)	2.75	2.75
Circumference	(m)	353.74	354.10
Straight ratio	(%)	24	46
Number of straight sections		20	24
RMS Natural H. emittance	(pm.rad)	81	4000
RMS Coupled H&V Emittance	(pm.rad)	53	
RMS Energy spread	(%)	0.09	0.10
RMS Natural Bunch length	(ps)	9.18	15.17
	(mm)	2.7	4.6
Harmonic number		416	416
Main RF frequency	(MHz)	352.56	352.20
Energy loss per turn W/o ID	(keV)	490	917
RF Voltage	(MV)	1.38	2.9
Momentum compaction factor		$9.1 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-4}$
Synchrotron frequency	(kHz)	1.4	4.5
	(turns)	600	190
Damping times (H/V/L)	(ms)	7.3 / 13.1 / 11.7	6.9 / 6.9 / 3.5
	(turns)	6000 / 11000 / 10000	5800 / 5800 / 2900
Nominal tunes (H/V/L)		54.2 / 18.2	18.16 / 10.22
Natural chromaticities (H/V)		-108 / -65	-53 / -19
Corrected chromaticities (H/V)		+1.6 / +1.6	+1.3 / +2.2

Schéma d'Implantation de SOLEIL 29 lignes de lumières

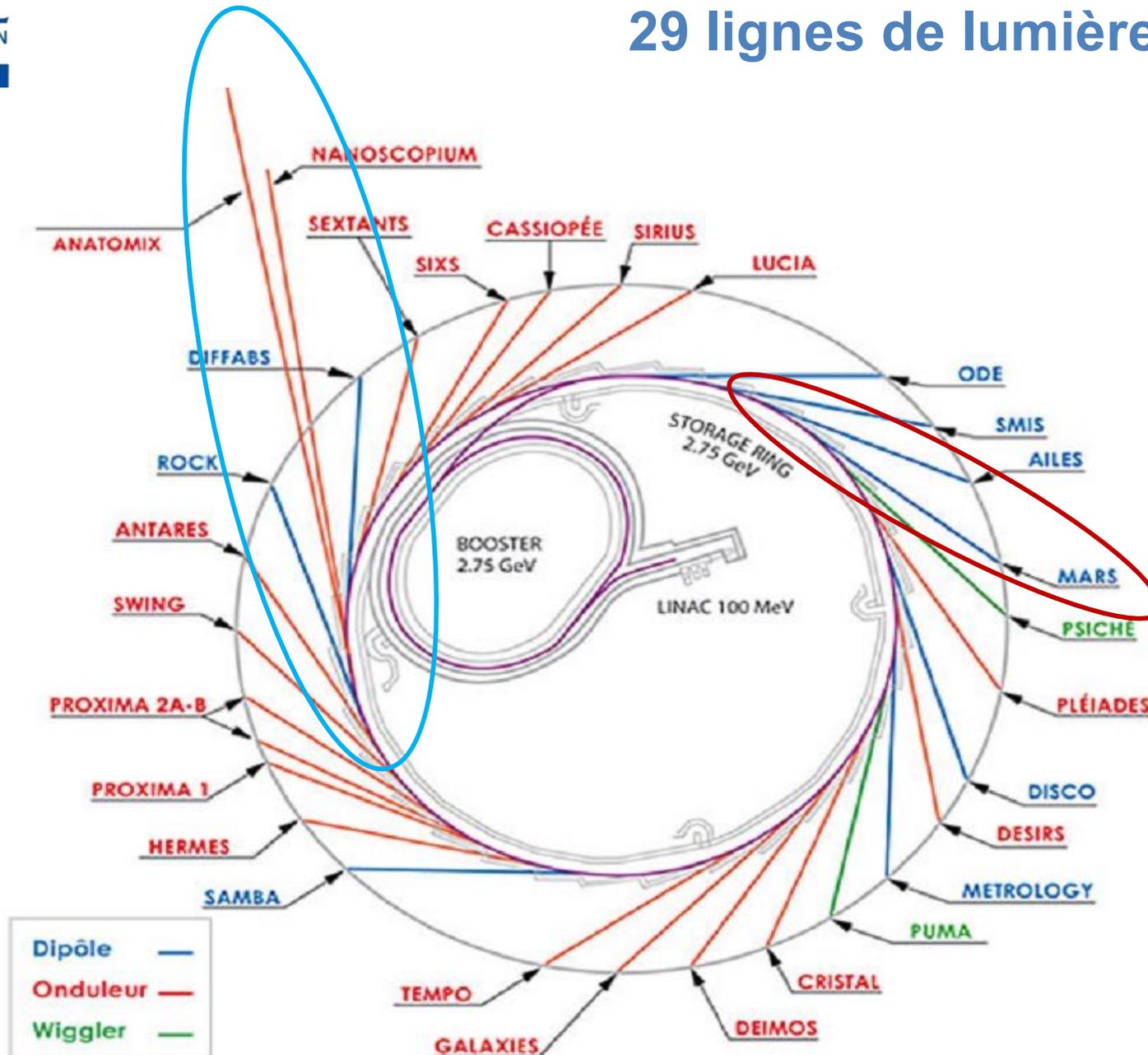
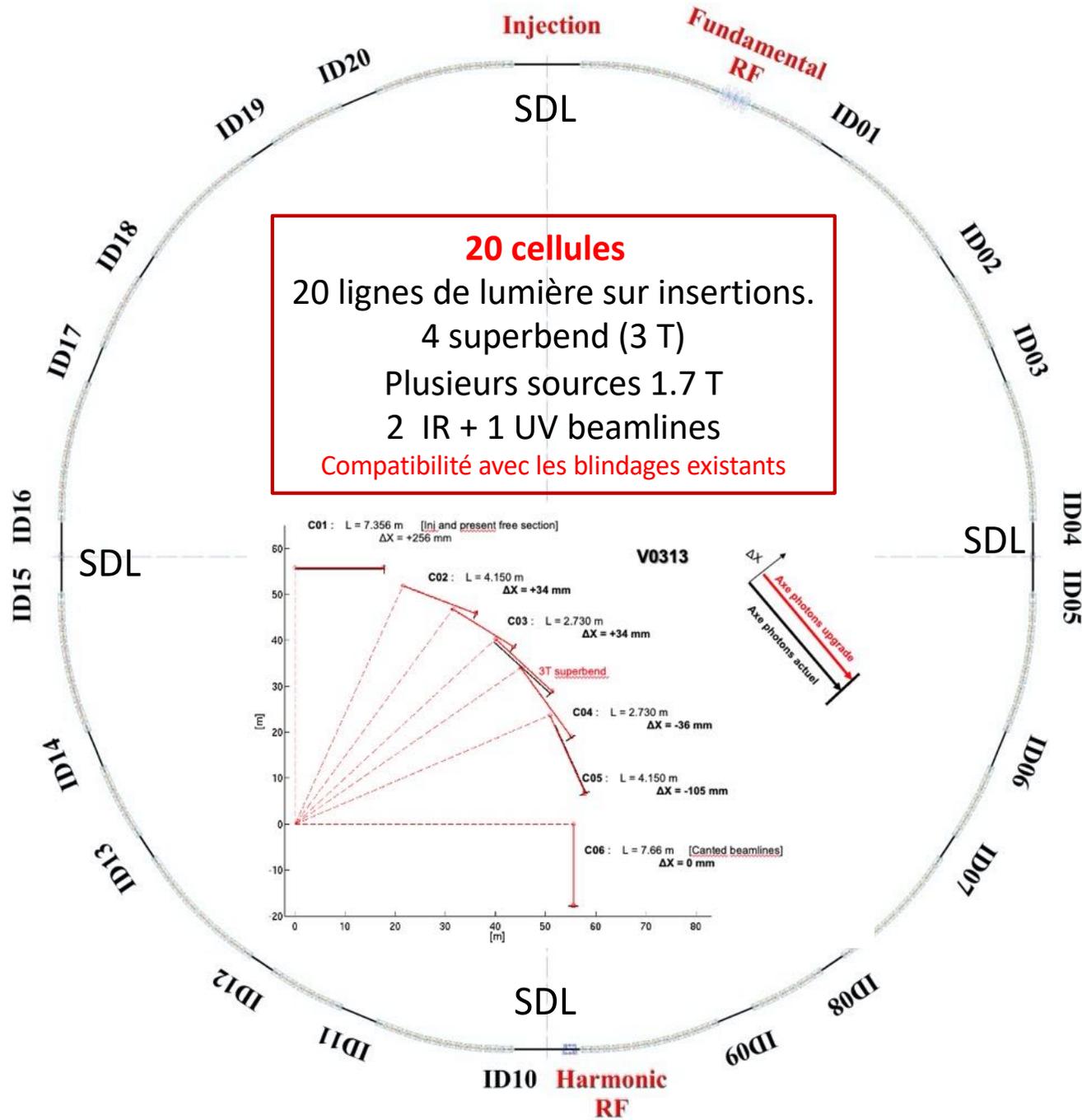
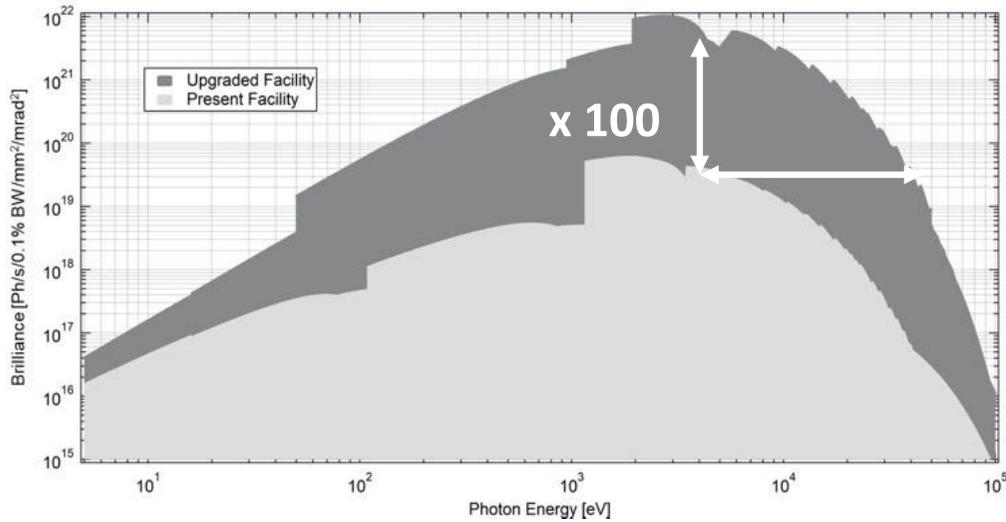


Schéma d'Implantation au Stade de l'APS

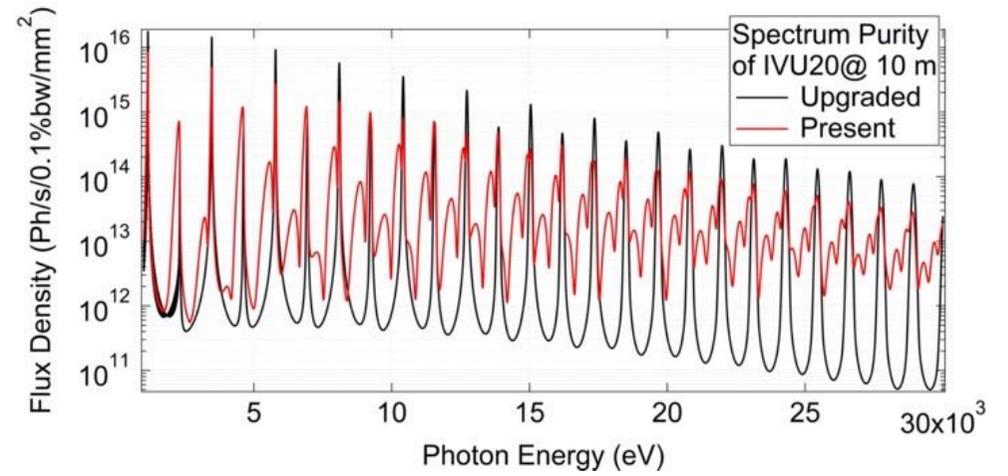




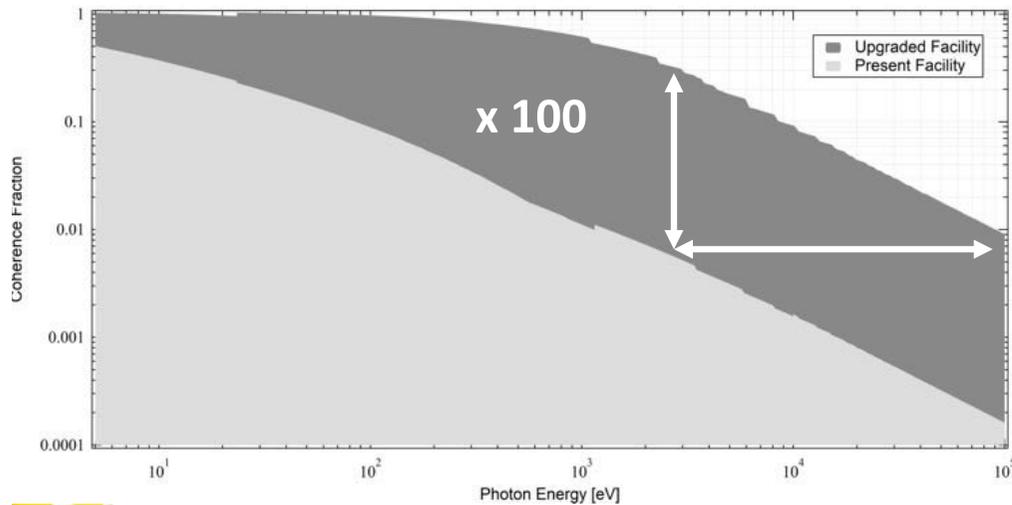
PHOTON BRILLIANCE AND TRANSVERSE COHERENCE



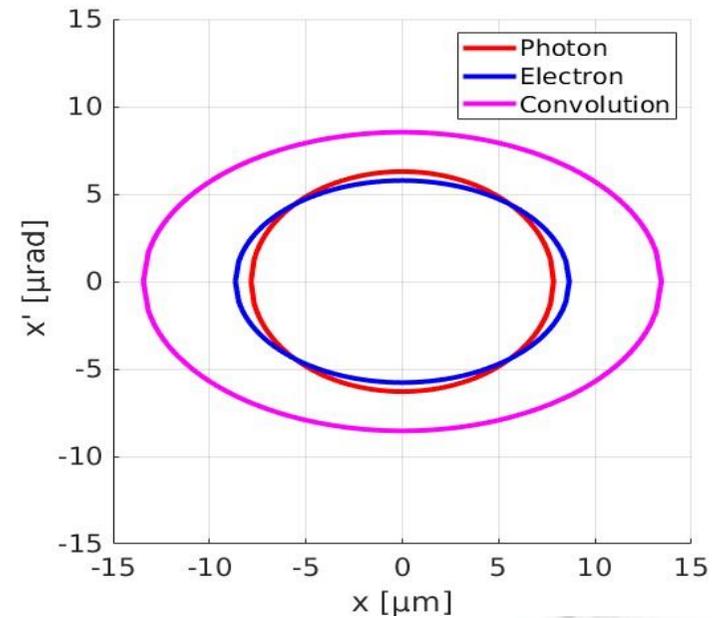
Brilliance



Finesse spectrale



Flux cohérent transverse

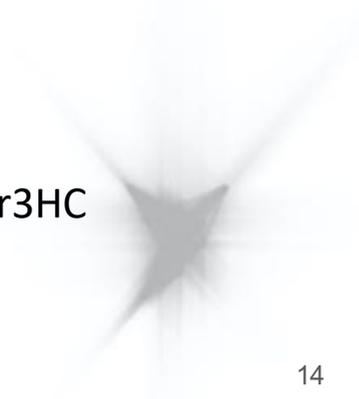


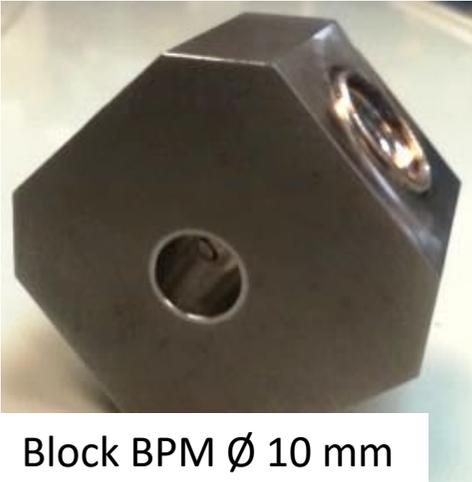
Adaptation ellipse Photons / Electrons



Points Particuliers du Projet Accélérateur

- **Compacité et combinaison non standard** de cellules HOA **7BA-4BA (20 section droites)**
- Possibilité de travailler sur la **résonance de couplage**
- Injection au moyen d'un **kicker multipolaire non linéaire** (inj. à 3.5 mm de l'axe faisceau)
- Installation avec une **moindre empreinte énergétique**
 - Réduction consommation électrique de 2/3
 - Réduction significative du coût de fonctionnement
 - Utilisation massive d'aimants permanents (dipôles, reversed bend, >70% quad.)
- **Champs magnétiques** à limite de la technologie (quadrupôle : max. $\sim 140 \text{ T.m}^{-1}$, sextupôle : max $\sim 8000 \text{ T.m}^{-2}$, octupôle : max $\sim 250000 \text{ T.m}^{-3}$).
- Chambre à vide de diamètre intérieur **10-12 mm (NEG)**
- **Sources de Photons** innovantes
- **Système RF** chaud 352 MHz + cavités harmoniques froides passives type super3HC
- Compatibilité avec **une opération paquet court** : 12 ps FWHM

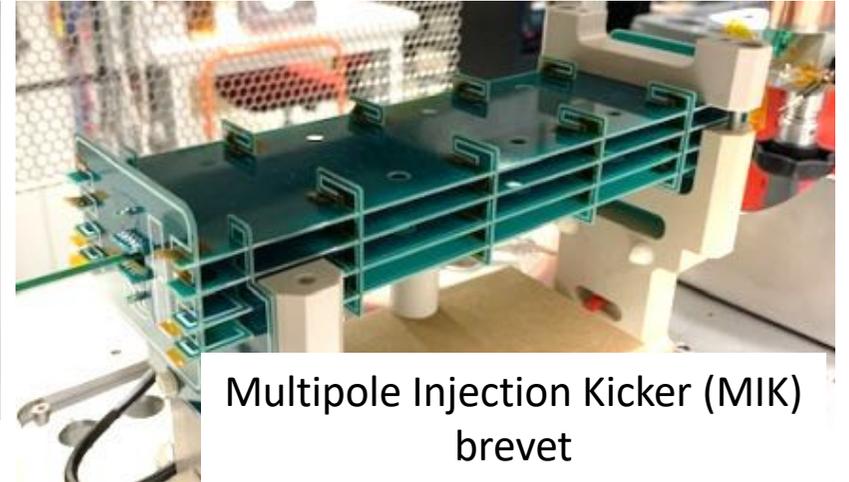




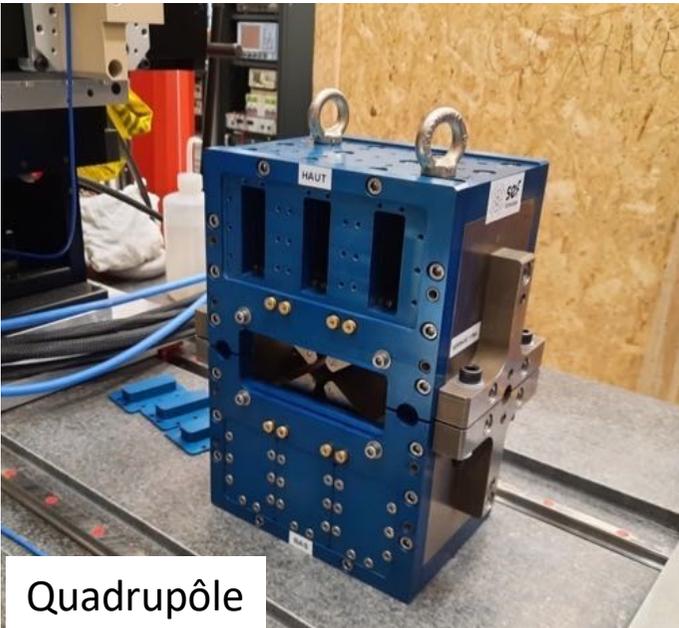
Block BPM \varnothing 10 mm



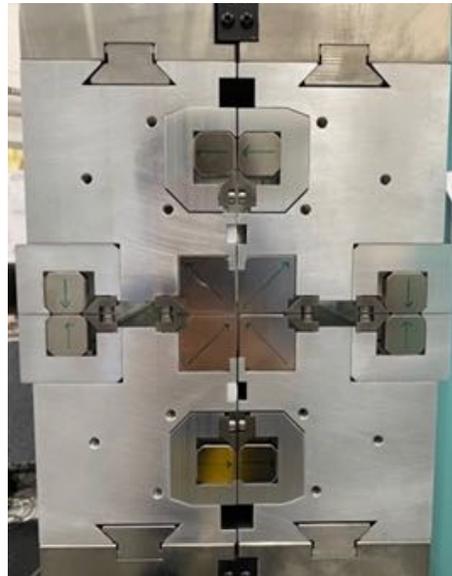
Soufflet 57 à 60 mm



Multipole Injection Kicker (MIK)
brevet



Quadrupôle
permanent



CPMUE Onduleur 12 mm



Ligne de photo désorption /
qualification du NEG (\varnothing 63, 20, 15
10 and 6 mm)

Des Aimants, Compacts, nombreux à la Limite de la Technologie

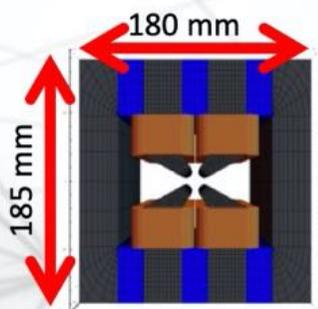
Un exemple pour une maille candidate

4 familles de dipôles	1 T et 0.7 T	116	(aimants permanents)
4 familles de reverse-bends	-0.2 T	192	(aimants permanents)
16 familles de quadrupoles	110 T/m	160	(aimants permanents)
Sextupoles	2000 à 8000 T/m ²	368	
Octupoles	20000 à 220000 T/m ³	176	
		<hr/>	
		1012	

Ils restent très similaires aux précédentes mailles

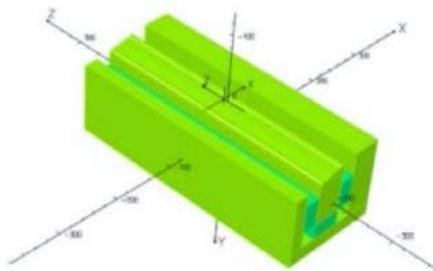
Prototypes :

Quadrupole en 2020



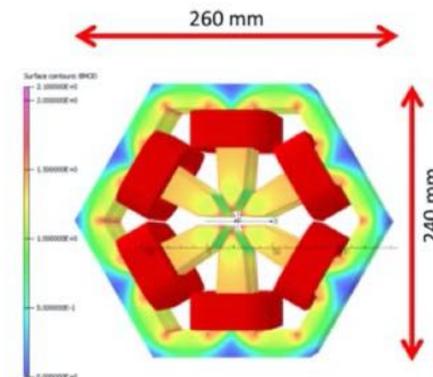
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
 $G = 110 \text{ T/m}$
 + Variable sur $\pm 5 \%$

Dipôle en 2021



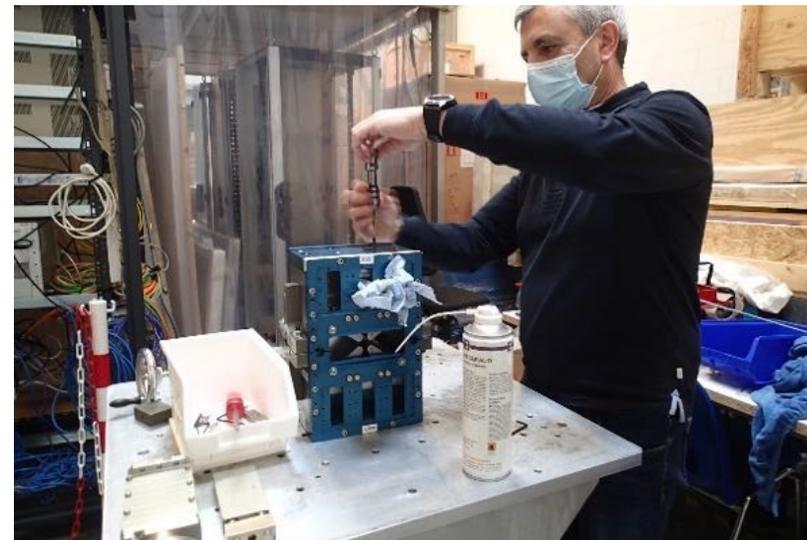
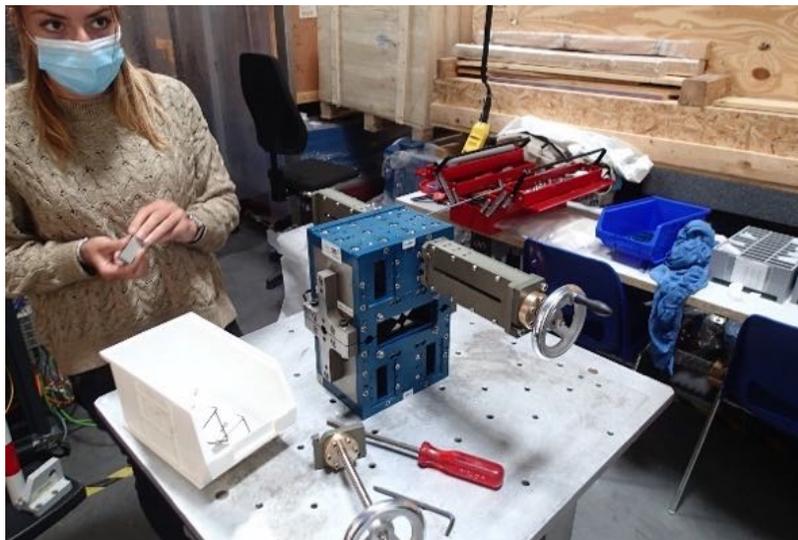
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
 $B = 1 \text{ et } 0.7 \text{ T}$
 $G = 20 \text{ et } 16 \text{ T/m}$

Sextupoles en 2021



Électromagnétique
 $S = 8200 \text{ T/m}^2$

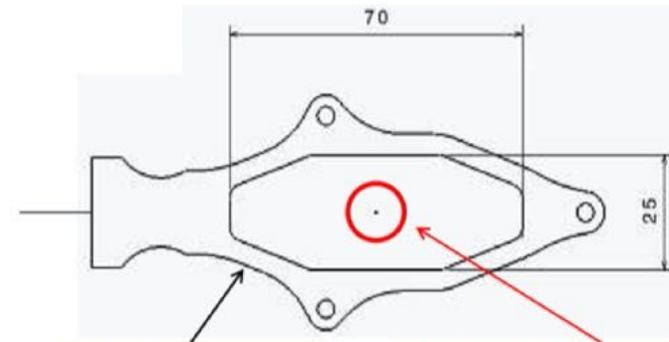
- Les différents prototypes d'aimants de l'upgrade seront réalisés en collaboration avec des **industriels français**.
- Le prototype du quadrupôle est le premier prototype d'aimants pour lequel une collaboration est mise en place (signature le 29/04/2021).
- Première visite de SEF (Toulouse) à SOLEIL du 25 au 28 mai:
 - Prise en main du quadrupôle et de l'outillage pour insérer les aimants dans la culasse.
 - Identifier des améliorations possibles de l'outillage.
 - Identifier des pistes pour simplifier le design et le coût de l'aimant.
- Participation de SEF aux mesures magnétiques du 31 mai au 11 juin 2021



Réduction importante des dimensions des chambres à vide : **10 mm** de diamètre interne

Pompage standard par pompe ionique très limité

Environ **95 %** de l'anneau devra comporter un dépôt NEG



SOLEIL today
Standard vac. Chamber
Qpole, Spole

SOLEIL UPGRADE project
center achromat
ø 10 mm internal diameter

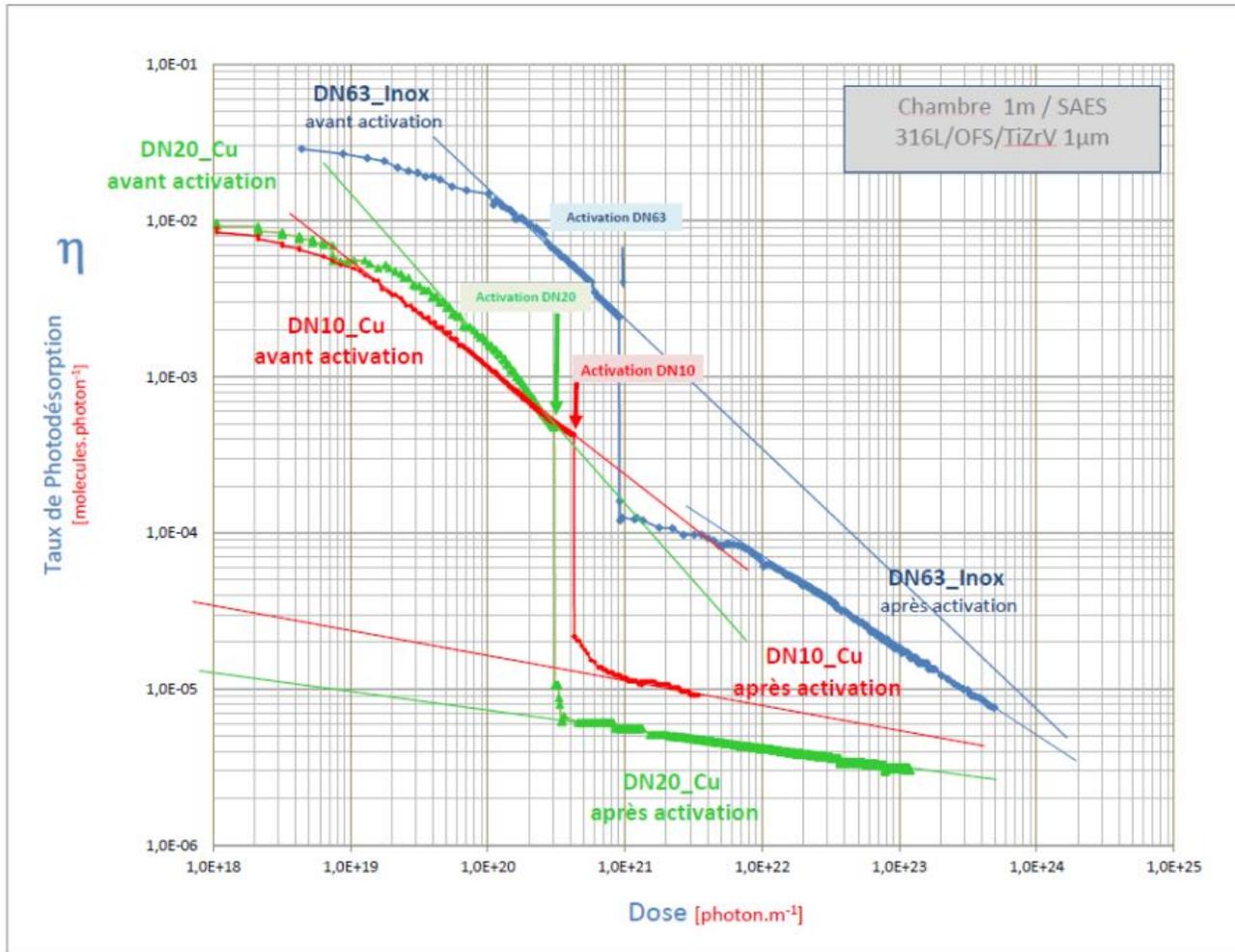


Profils en test au labo vide
 $\Phi = 20, 10, 6$ mm

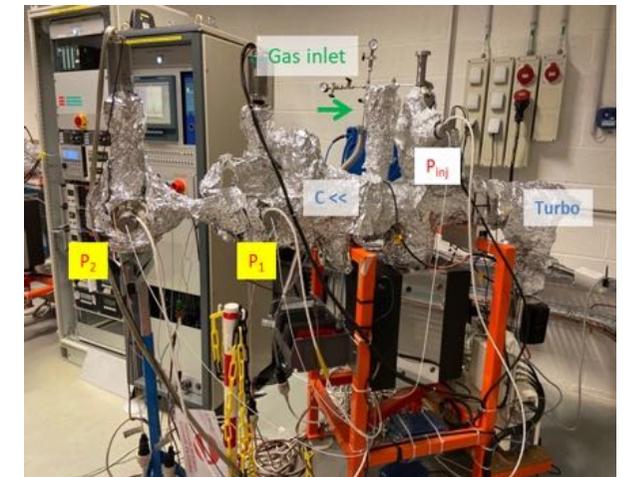
Profil actuel : 70 x 25 mm

Effacité du NEG pour une Chambre de

10 mm de Diamètre



Ligne de photo désorption

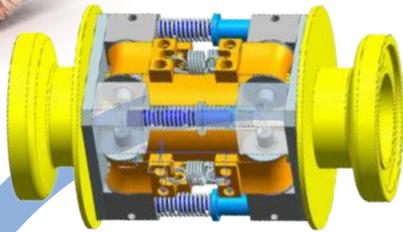


Banc de mesure

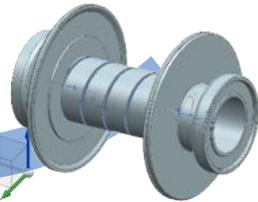
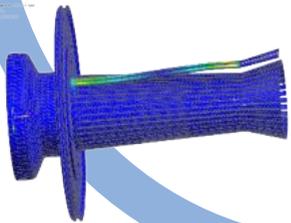
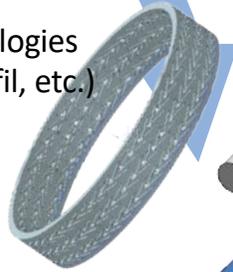
Non-Evaporable Getter (NEG) : alliage ternaire Ti-Zr-V



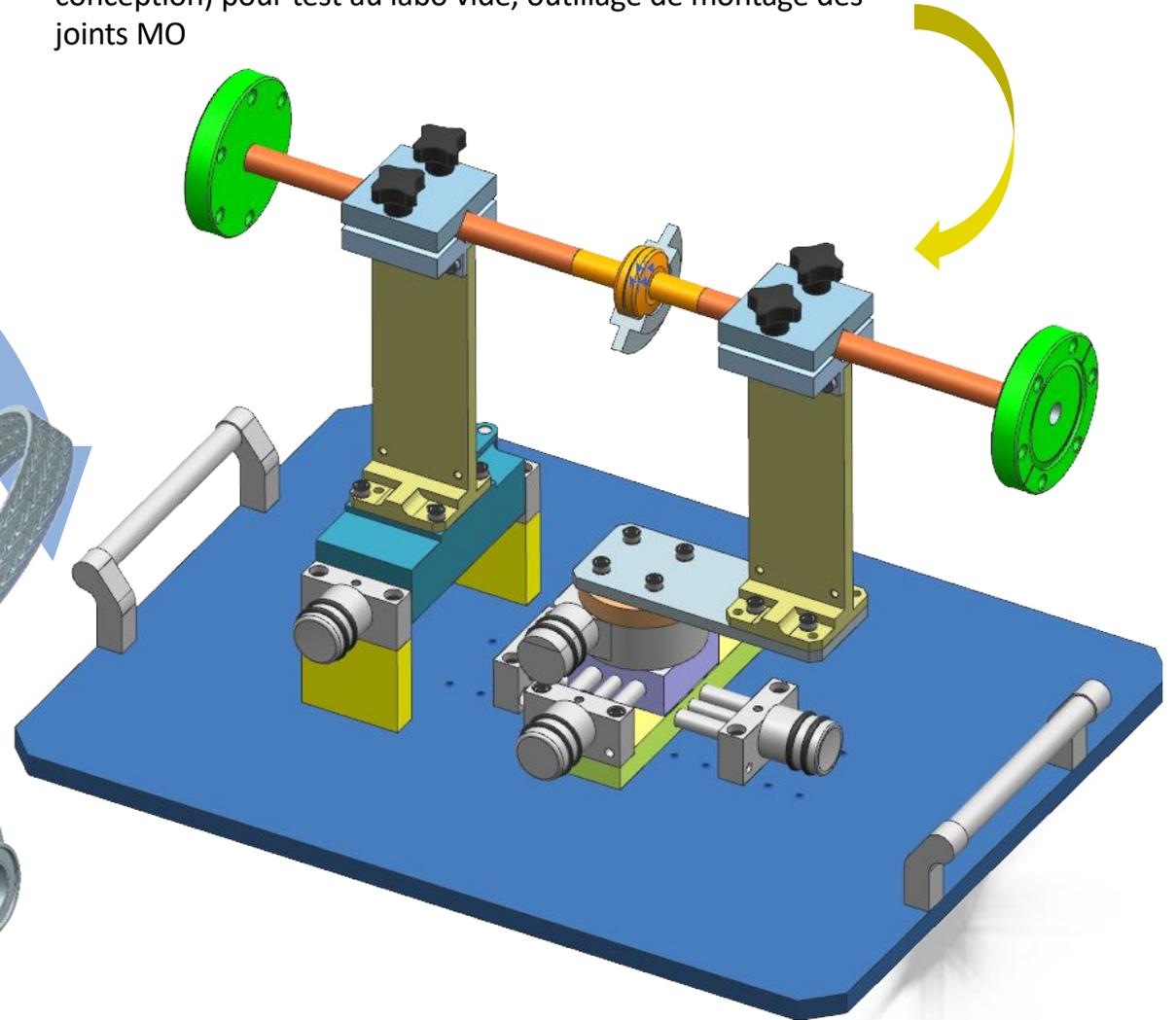
Ressorts CuBe Bal Seal à spires inclinées



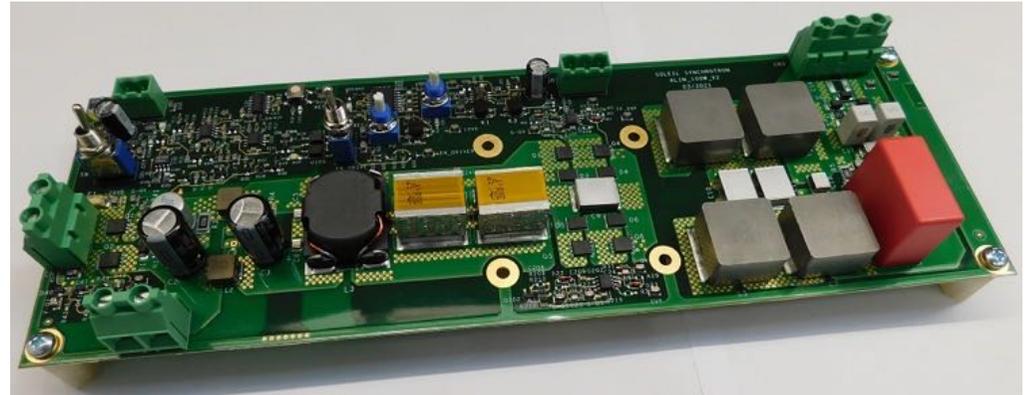
Brainstorming multi technologies
(Fab. additive, découpe au fil, etc.)



Banc de test de montage de chambres/soufflet (en conception) pour test au labo vide, outillage de montage des joints MO



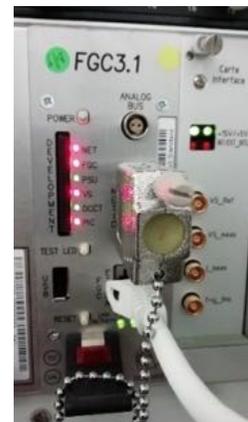
Maquette V2 Alimentation bipolaire 100 W



- Maquettage de l'alimentation bipolaire 100 W 20 A: réalisation d'une maquette V2 pour valider les choix techniques et technologiques.

- Collaboration avec le CERN sur la plateforme FGC3 de contrôle/régulation pour alimentations

- Evaluation du système FGC (*Function Generator Controller*) développé par le CERN : Collaboration démarrée avec le CERN en mai 2019.
- Résultats significatifs de 2021 :
 - Premiers essais avec faisceau en mars sur des alimentations de correcteurs de l'anneau de stockage et résultats concluants.
 - Caractérisation des limites de performances du FGC3 et vérification de l'adéquation avec les besoins pour l'*Upgrade* en cours.

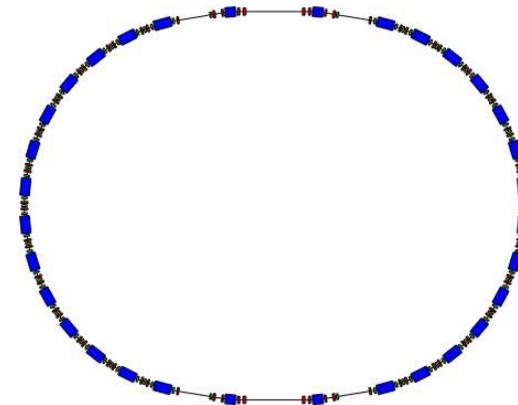
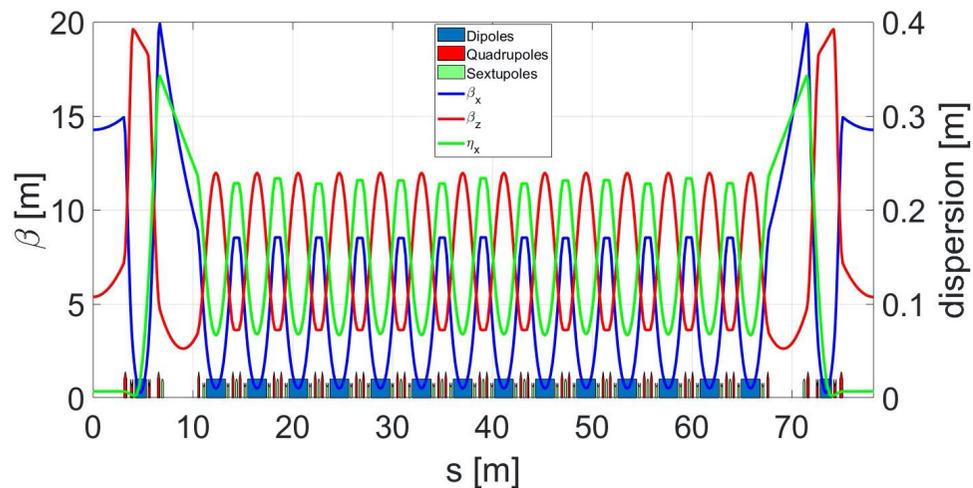


Alimentations de correcteurs Anneau actuelles pilotées par FGC



Nouveau Booster

- Les études d'injection dans l'anneau « upgrade » montrent la nécessité de baisser drastiquement l'émittance du booster injecteur (de 140 à **10 nm.rad**).
- Le design d'une nouvelle maille booster a démarré (décembre 2020), en collaboration avec le laboratoire NSRL (National Synchrotron Radiation Laboratory, Chine).
- Une structure projet 'injecteur' est en cours d'élaboration (GT 1.11 du programme Accélérateurs).

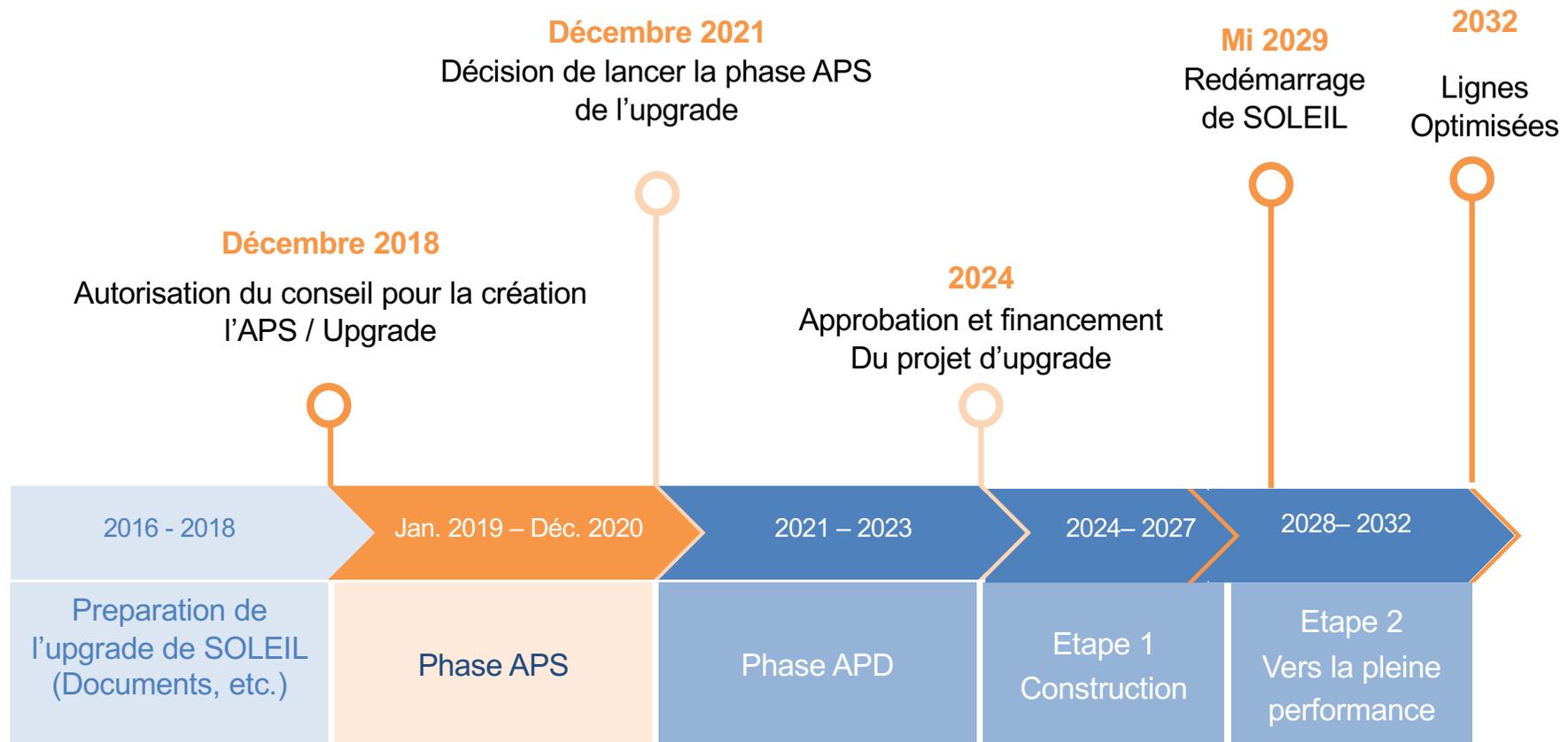


Parameter	Unit	Present booster	Upgraded booster (v1)
Natural emittance	nm.rad	140	5.6
RMS bunch length	ps	50	25
Min. - max. energy	GeV	0.1-2.75	0.15-2.75



Première version de maille booster « upgrade » répondant aux spécifications en termes de :

- *Implantation dans le tunnel du booster actuel*
- *Emittance et longueur de paquet.*



- SOLEIL : upgrade très ambitieux et complémentaire à l'ESRF
 - La plus haute brillance dans sa catégorie ne résulte pas d'une recherche de la performance à tout prix mais est un gage d'adaptabilité à l'avenir.
 - La phase APS s'est terminée avec la [publication en juin du rapport CDR](#)

- Objectifs de la Phase de l'Avant Projet Détaillé (APD)
 - **Figurer la maille de l'anneau** en prenant un compte une **intégration mécanique** la plus réaliste possible et en intégrant les demandes récentes
 - Diagnostics, collimateurs, compatibilité les onduleurs conservés dans la phase 1
 - **Extraction du rayonnement** : Gestion des puissances linéiques et surfaciques extrêmement élevés par rapport aux autres projets d'upgrade
 - Construire les prototypes pour **lever les verrous technologiques** et choisir les technologiques
 - Choix du **schéma définitif d'injection**
 - Affiner les spécifications des équipements
 - Interaction avec la division Expériences et modes futurs d'opération
 - **Anticiper les besoins logistiques et en bâtiments** avec en particulier la construction de l'extension du bâtiment synchrotron (Oreille Est) et du bâtiment T7 (nouvelle station de refroidissement).
 - Affiner le **plan charge**, les budgets, préparer les cahiers de charge des équipements
 - Dossiers de démantèlement (ANS/BOO), gestion des déchets

- Construire avec les tutelles et les structures locales le plan de financement le adéquat

