

Axe Accélérateurs de Leptons Les Sources de Rayonnement synchrotron



Laurent S. Nadolski (SOLEIL), S. White (ESRF)
13 décembre 2023

- Contexte International (DLSR)
- Sources de rayonnement synchrotron
 - Source nationale : SOLEIL
 - Source européenne : ESRF
- Intense R&D autour des Accélérateurs
- Domaines d'expertise

SCIPAC ambitionne de **rassembler la communauté** des laboratoires français travaillant sur les accélérateurs de particules pour **accompagner la recherche** en vue de **répondre aux grands projets, en développement et futurs**. Les missions principales du GDR sont de mener l'animation scientifique au niveau national pour **promouvoir l'activité de recherche, de fédérer et structurer la communauté** et enfin de favoriser l'émergence **d'initiatives transverses**.

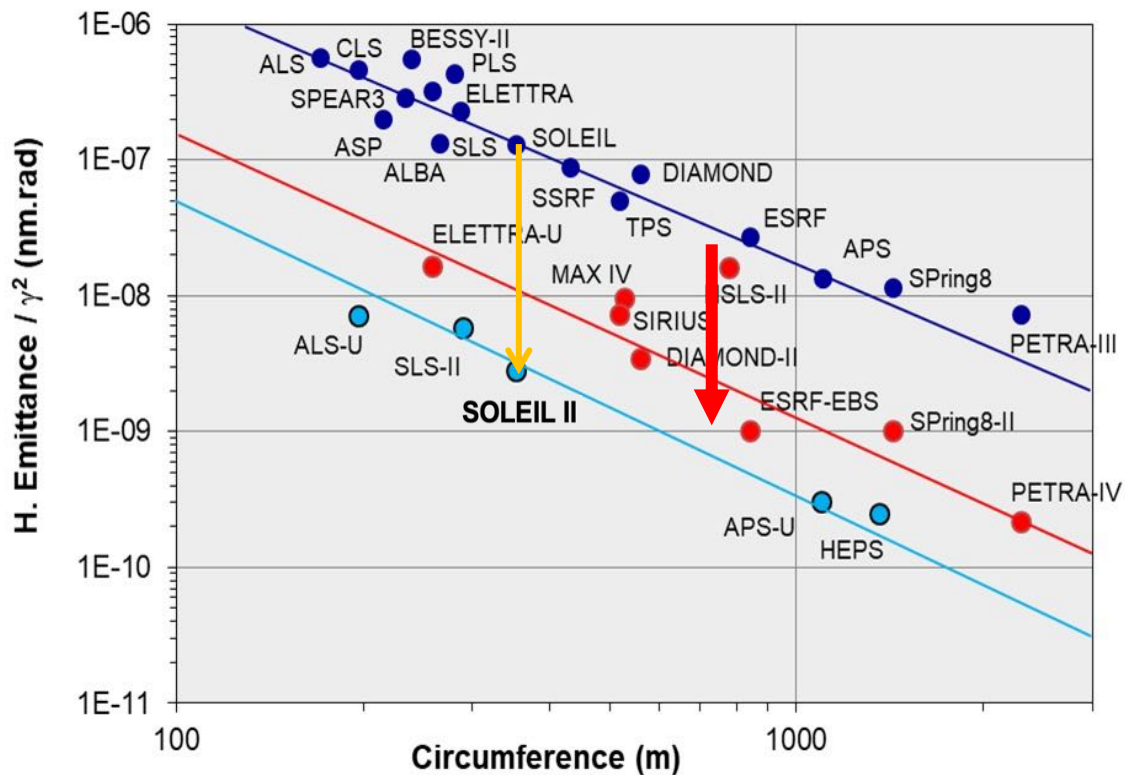
Une attention particulière est portée à la promotion des activités de recherche des jeunes de la communauté, mais aussi au **renfort de l'attractivité de la discipline auprès des futures générations**.

Le GDR est structuré en quatre axes thématiques reflétant le panorama des axes prioritaires de la discipline:

1. Accélération d'ions lourds
2. Accélération de hadrons
3. Accélération de leptons
4. Accélération laser plasma et nouveaux concepts

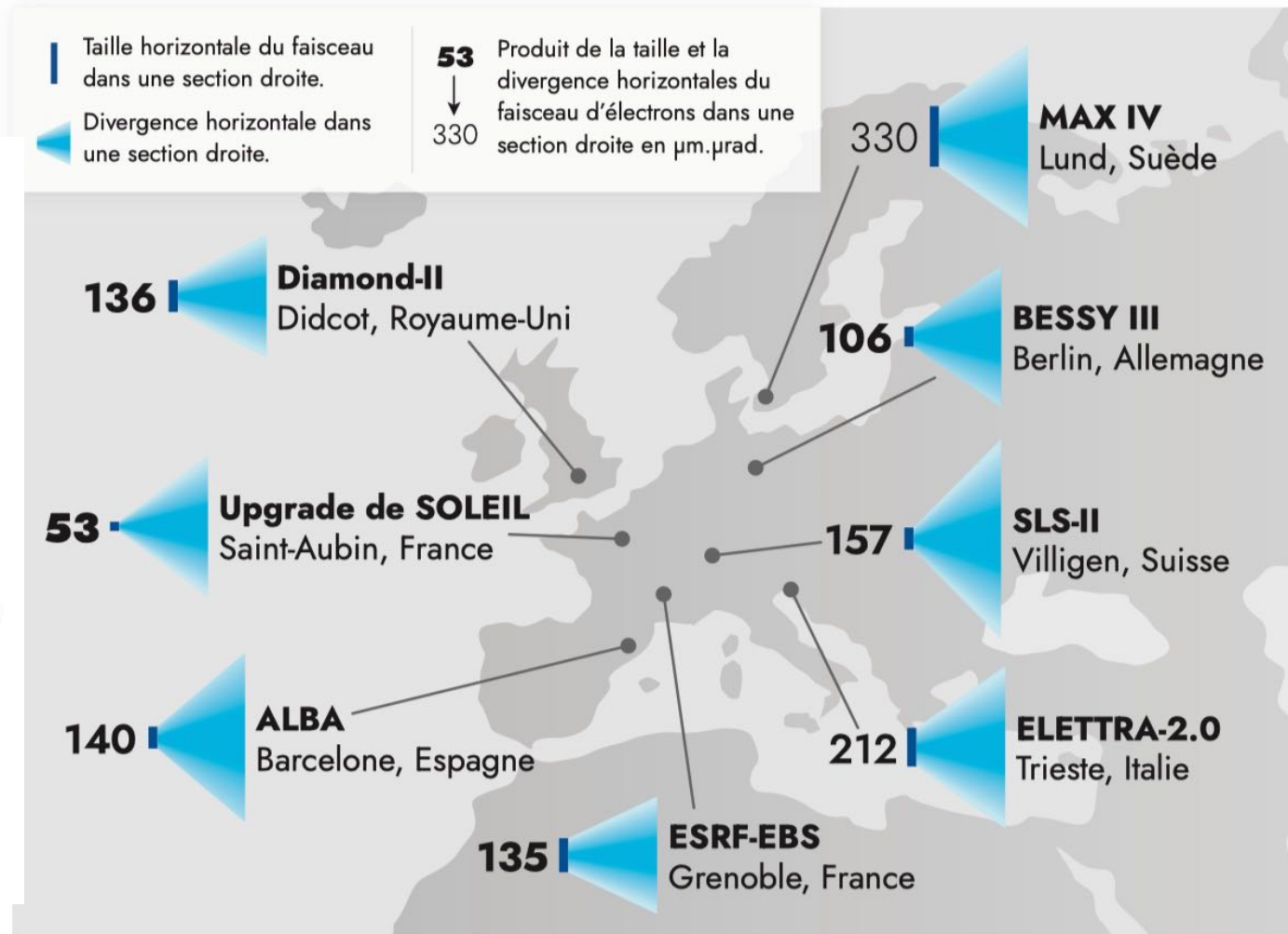
NB: Support hybride de présentation (français/anglais)

ESRF-EBS : première upgrade d'une source de lumière les anneaux de faible émittance



SOLEIL, LE PROJET LE PLUS AMBITIEUX DE SA CATÉGORIE DANS UN ÉCOSYSTÈME EN PLEINE MUTATION

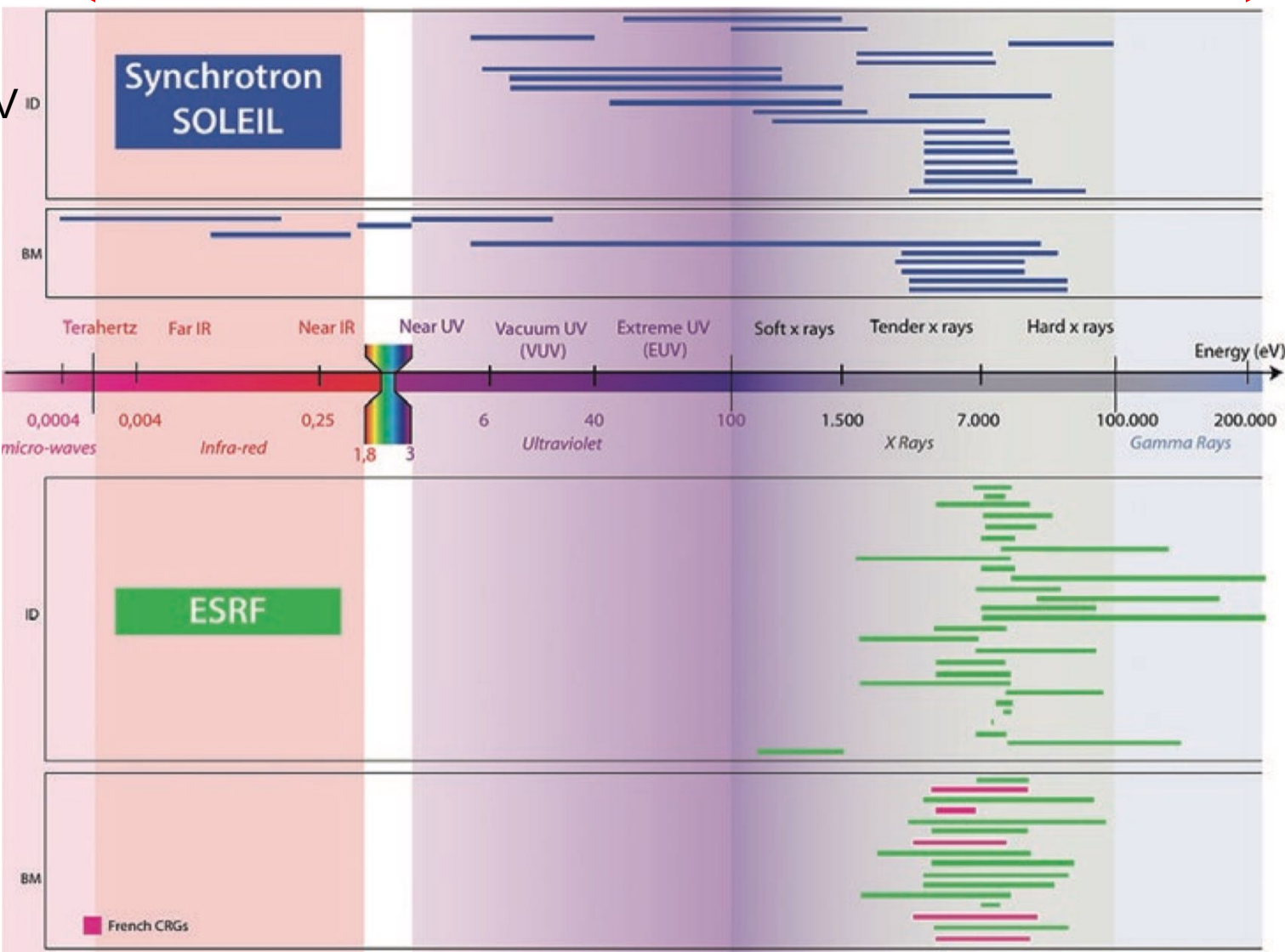
Carte des synchrotrons européens de nouvelle génération.



Domaine spectral très large : 9 ordres de grandeur

2.75 GeV
354 m

Synchrotron
SOLEIL



6 GeV
844 m

ESRF

EXPÉRIENCES
JUSQU'À 10 000 FOIS
PLUS RAPIDES

RÉOLUTION À L'ÉCHELLE
NANOMÉTRIQUE

EXPÉRIENCES
JUSQU'À 1 000 FOIS
PLUS SENSIBLES

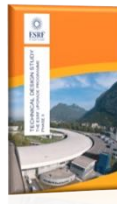
ETUDE DE DISPOSITIFS
EN CONDITIONS RÉELLES
DE FONCTIONNEMENT

SOURCE DE LUMIÈRE
UNIQUE, DE L'INFRAROUGE
AUX X DURS

DES LIGNES DE LUMIÈRE
ET DES TECHNIQUES
COMPLÉMENTAIRES

ESRF ACCELERATOR COMPLEX

Purple Book
January 2008



Orange Book
January 2015

ESRF UPGRADE PHASE I
180 M€ (2009-2015):
ESFRI ROADMAP 2006-2016
ON TIME – WITHIN BUDGET

- 19 new beamlines, many specialised in *nano*-beam science
- Upgrade and renewal of facilities and support laboratories

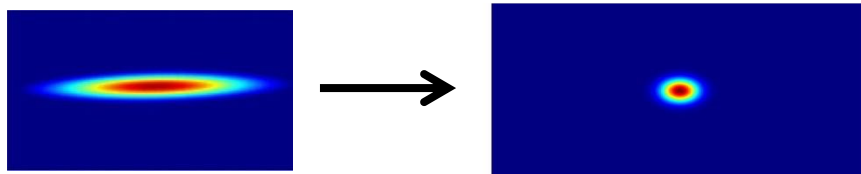


ESRF-EBS
Extremely Brilliant Source
150 M€ (2015-2022):
ESFRI LANDMARK (2016)

Revolutionary design for a new generation of synchrotron source storage rings

The ESRF Extremely Brilliant Source upgrade:

- Decrease the horizontal emittance
- Increase the source brilliance
- Increase the source coherence

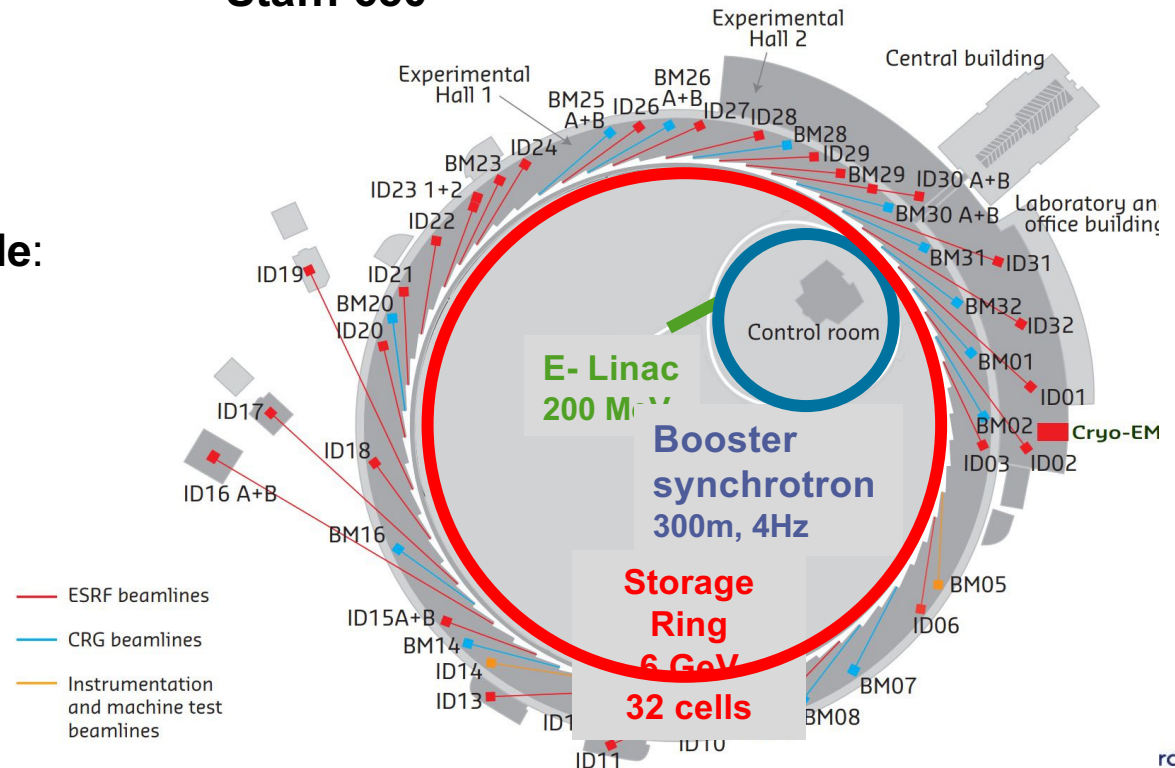


Light source in operation since 1994 located in Grenoble, France:

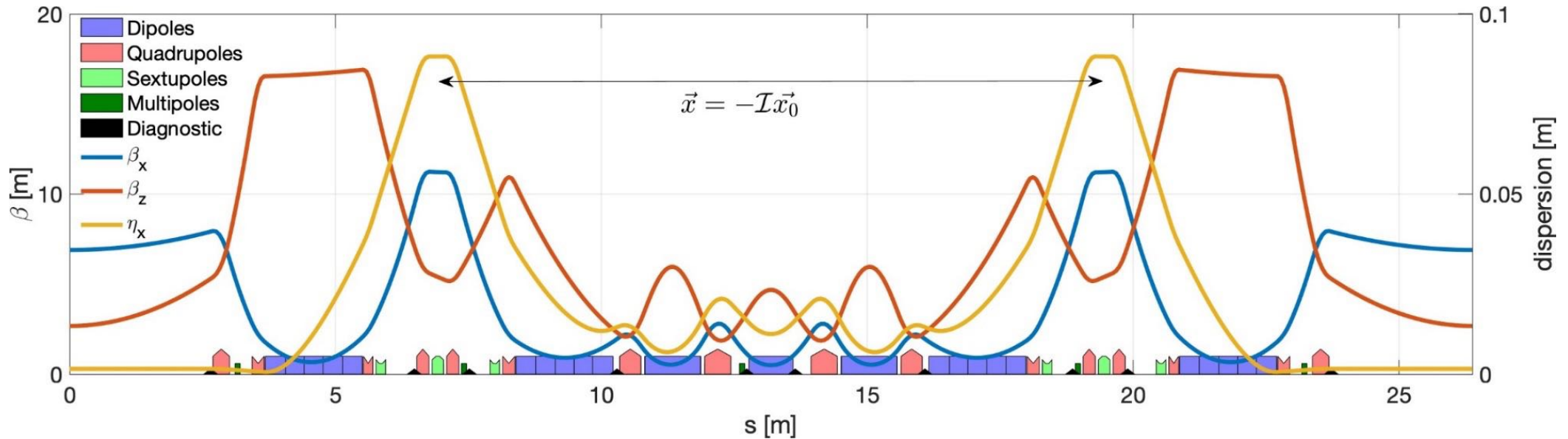
- 33 Insertion Devices (ID) end stations
- 16 Bending Magnets (BM) end station
- 1 Cryo-Electron Microscope (Cryo-EM)

22 partner nations:

- Annual budget: 100 million euros
- Staff: 650



HMBA LATTICE

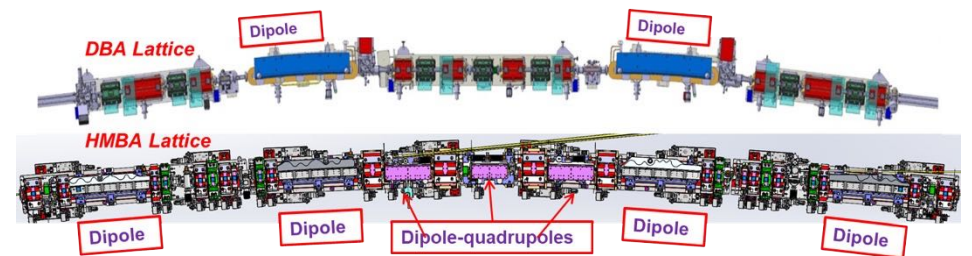


Main design constraints are:

- Horizontal equilibrium emittance of <150 pm.rad
- Fit existing tunnel and infrastructure and maintain beamlines
- Use existing injectors chain
- Minimize energy loss and power consumption

HMBA technical solutions:

- Longer and weaker “Multi-Bends”: combined function magnets with low
- dispersion + longitudinal gradient permanent dipoles
- Dispersion bump with -I transform: weaker, fewer sextupoles with partial compensation of aberrations for improved lifetime and acceptance



31 magnets per cell instead of 17

ESRF-EBS design:

- **Horizontal emittance ~135 pm.rad**
- **Touschek Lifetime ~20h**
- **Injection efficiency >90%**

Now running with design parameters

Injector upgrade was not part of the ESRF-EBS project, several actions initiated to support operation and improve performance

Operation support:

- Refurbishment of aging component / procurement of spare parts
- **Pulsed elements:** booster extraction in-vacuum septum
- **LINAC:** accelerating sections + power source

Performance improvement:

- **Injection perturbations during top-up:** new injection systems for the storage ring using non-linear kickers
- **Injection efficiency:** reduction of injection oscillations amplitude using fast stripline kicker

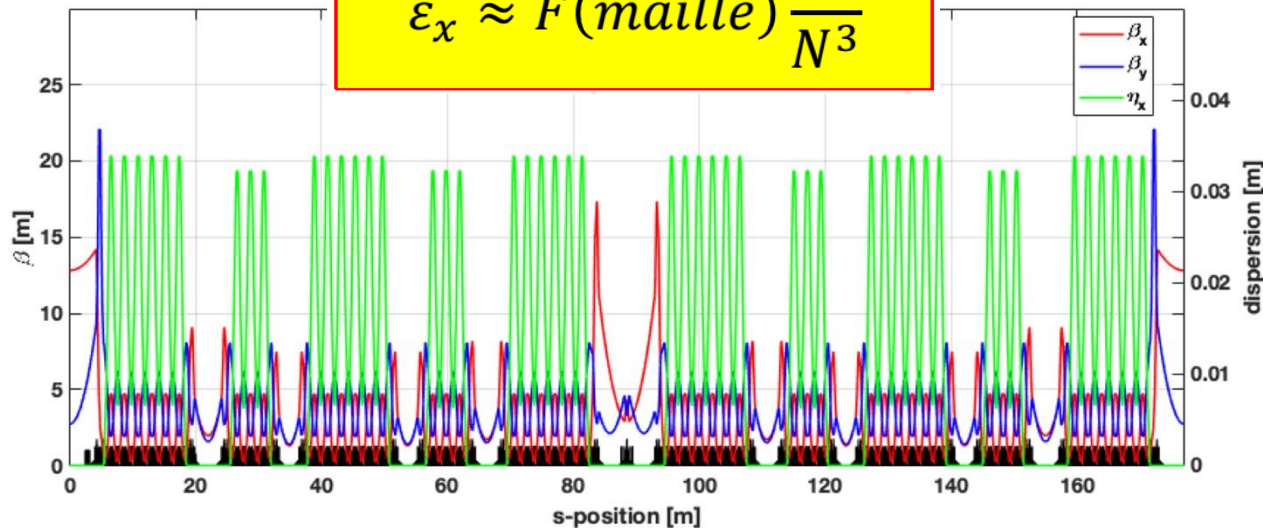
Strongly limited by characteristics of injected beam: complete renewal of injectors in the long term?

Upgrade Project of the SOLEIL Accelerator Complex
SRN, 2023

<https://doi.org/10.1080/08940886.2023.2186661>

29 lignes de lumière 1 microscope CRYO-EM

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



Fonctions de beta horizontale et verticale en rouge et bleu
Dispersion horizontale en vert le long d'un demi-anneau.

Anneau de symétrie 1 avec l'introduction d'une chicane pour permettre d'installer deux onduleurs sous vide pour desservir les 2 lignes longues de SOLEIL.

Parameters	SOLEIL	SOLEIL II
Energy [GeV]	2.75	2.75
Circumference [m]	354.10	353.97
Maximum Beam Current [mA]	500	500
Lattice Type	DBA	7BA-4BA
Cell Number	24	20
Natural Emittance [pm.rad] Round beam (100% coupling)	3 900 -	83 53
Energy Spread	1.02 E-3	0.91 E-3
Natural RMS Bunch Length [ps]	16.1	8.6
Transverse Damping Times, $\tau_x / \tau_y / \tau_s$ [ms]	6.9 / 6.9 / 3.5	7.8 / 14.3 / 12.4
Momentum Compaction Factor	4.2 E-4	1.06 E-4
Energy Loss per Turn [keV]	917	453
Overall RF Voltage [MV]	2.6	1.8
RF Frequency [MHz]	352.20	352.33
RF Power into the Beam [kW]	575	245
Synchrotron Frequency [kHz]	4.2	1.8

Paramètres sans l'effets des éléments d'insertion et sans les cavités harmoniques

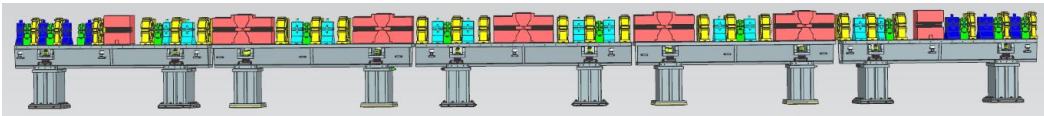
1. Maille MBA non standard : 12 x 7BA + 8 x 4BA / 2.75 GeV / 354 m.
2. ~85 pm.rad (~63 pm.rad with avec insertion et faisceau rond [but ultime]).
3. « 22 » section droites (7 longueurs différentes).
4. Domaine spectrale couvrant 9 ordres de grandeur (IR lointain aux X-durs).
5. Chambre à vide de faible 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.

+

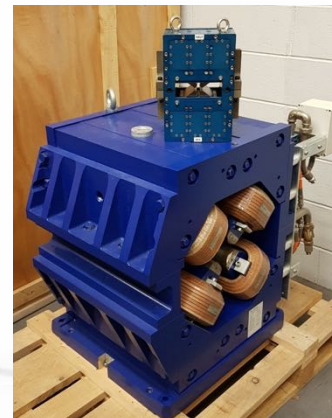
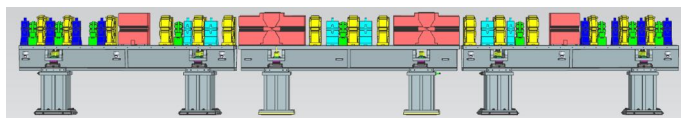
**LINAC* (100 → 150 MeV)
Nouveau Booster faible emit.
des insertions innovants**

* pré-upgrade

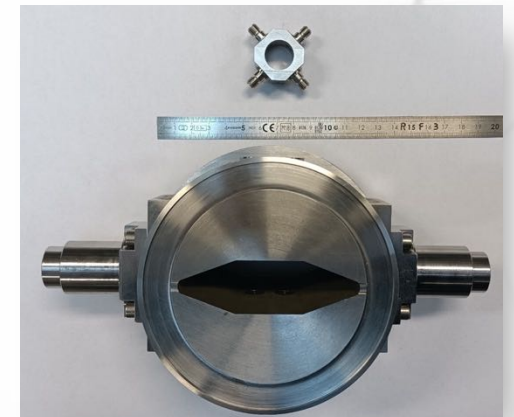
7BA



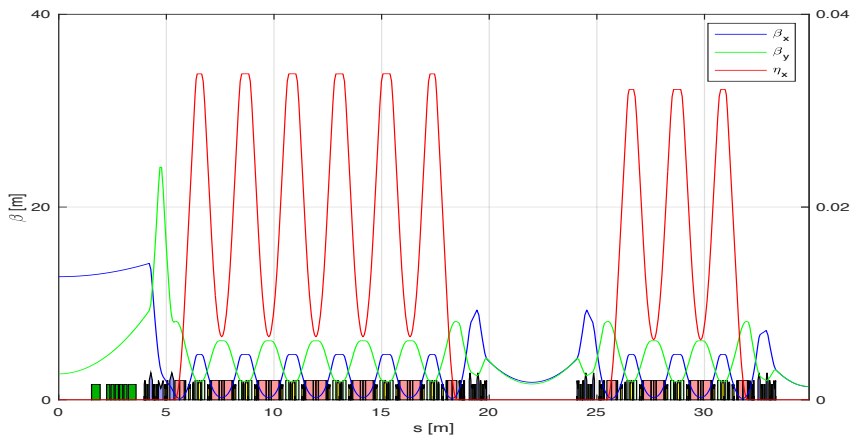
4BA



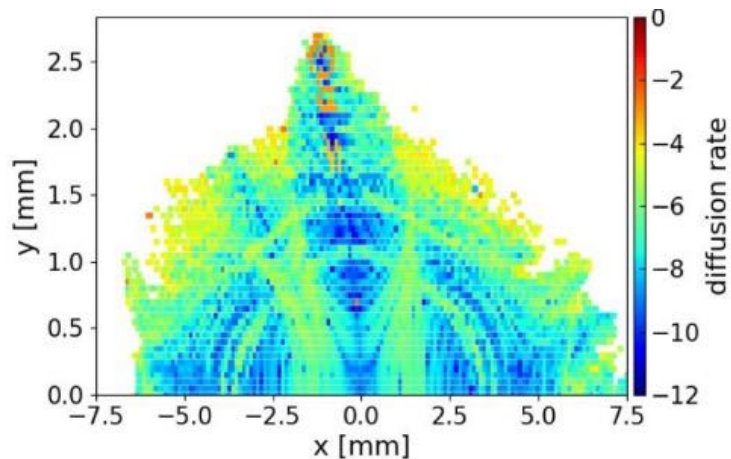
Quadrupôle à aimants permanents (prototype SOLEIL II) en haut et quadrupôle électromagnétique (SOLEIL) en bas



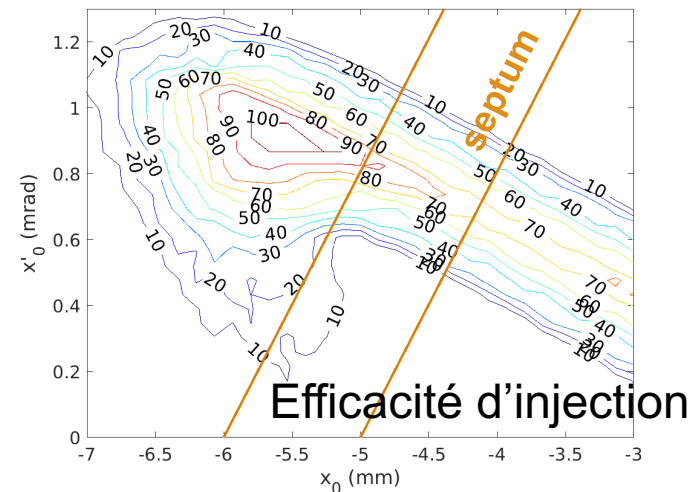
BPM de SOLEIL (bas) et BPM prototype SOLEIL II (haut)



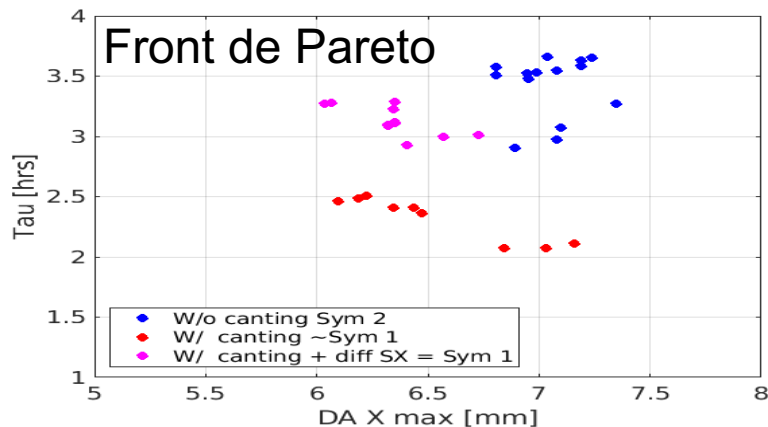
Conception de mailles



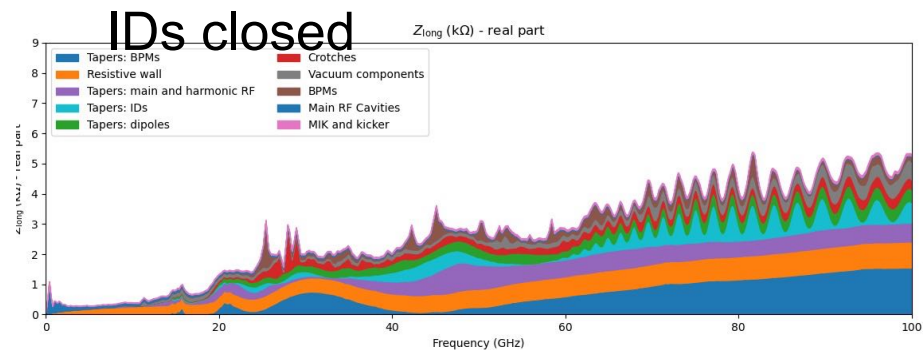
Ouverture dynamique



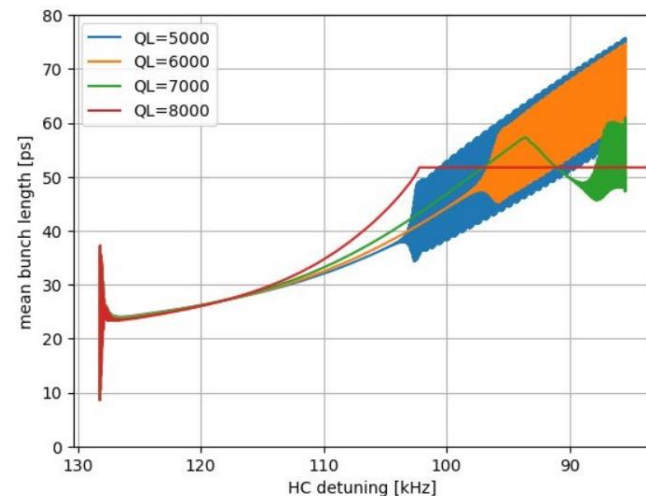
Efficacité d'injection



HPC. Simulations MOGA

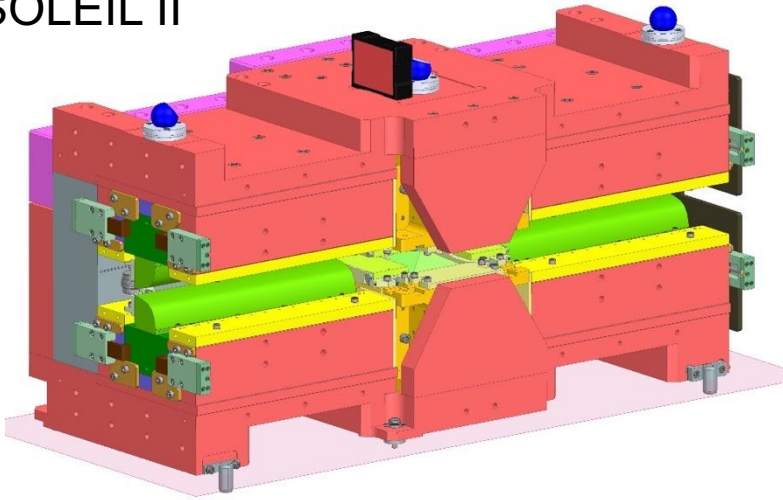


Calculs d'impédance

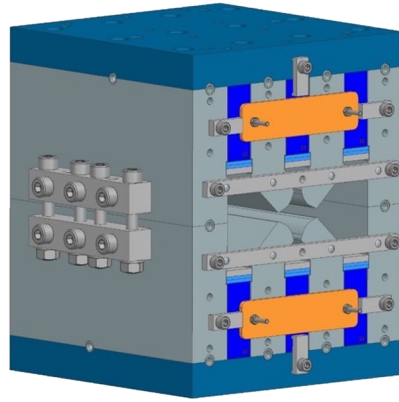


Seuil d'instabilité (Dipole-quadrupole)

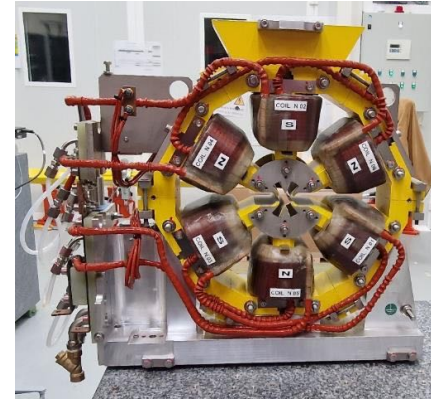
SOLEIL II



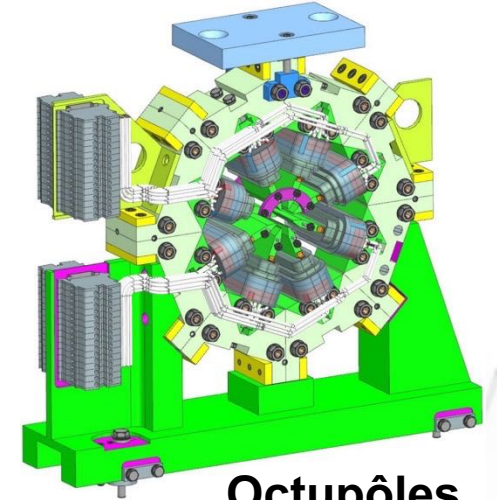
Dipôle 1.2, 1.7, 3 T



Quadripôle
Gradient max: 120 T/m

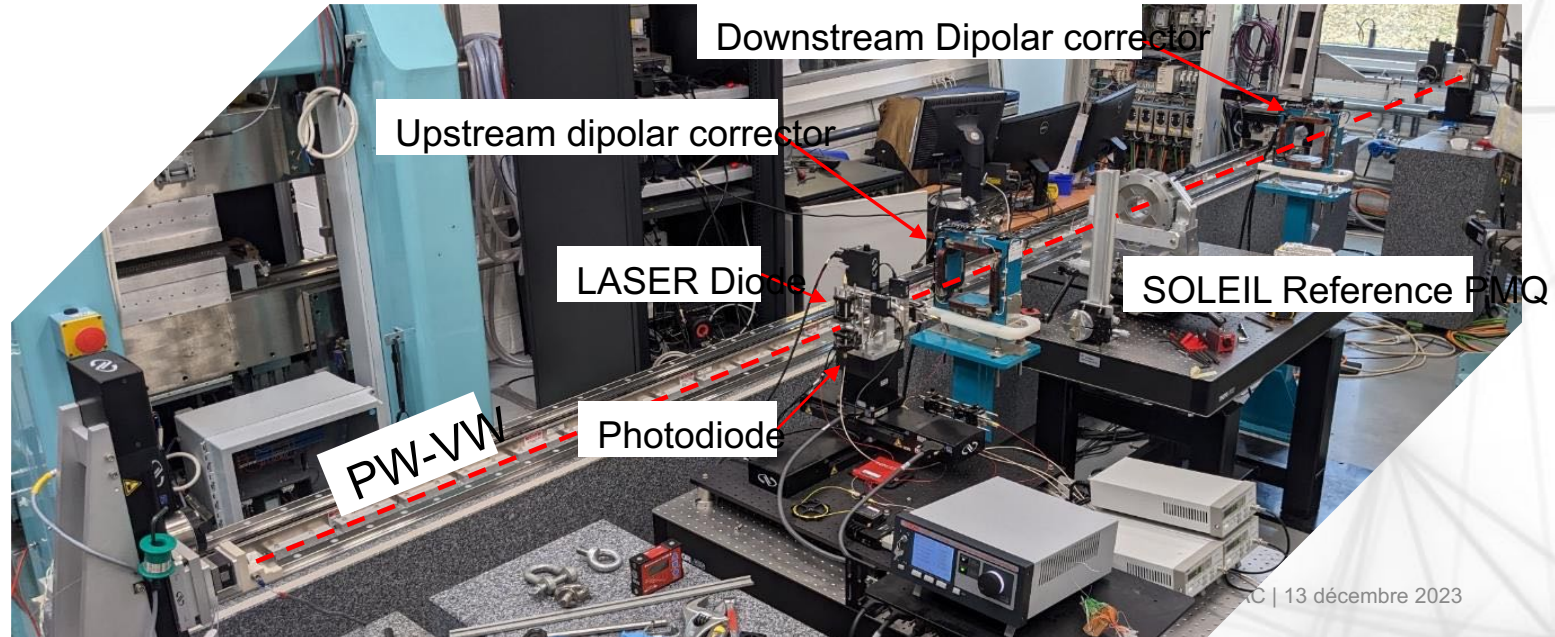


Sextupôles
Jusqu'à 8500 T/m².



Octupôles
55 000 T/m³

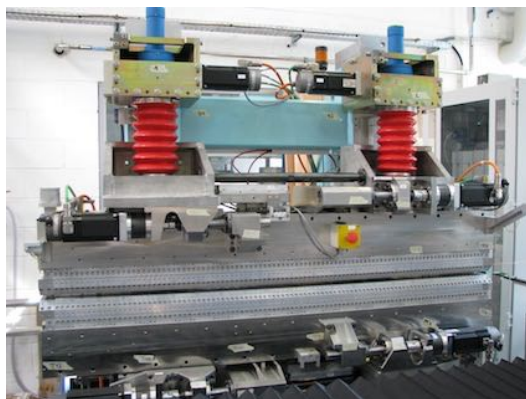
Banc de Mesures magnétiques





Electromagnetic:
1x HU640, 3x HU256

1x Combined Permanent
Magnets / Electromagnetic:
EMPHU HU65



12x APPLE 2: 3x HU80, 1x
HU64 full, 2x HU60, 2x HU52,
2 HU44, 1x HU42, 1x HU36



7 In-vacuum undulators:
6x U20, 1x U24

2(1)x Cryogenic PrFeB based
in-vacuum undulator U18 cryo



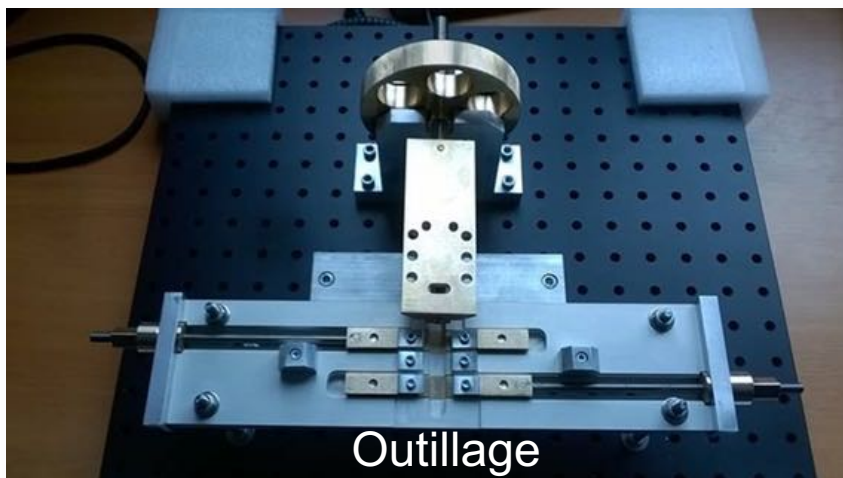
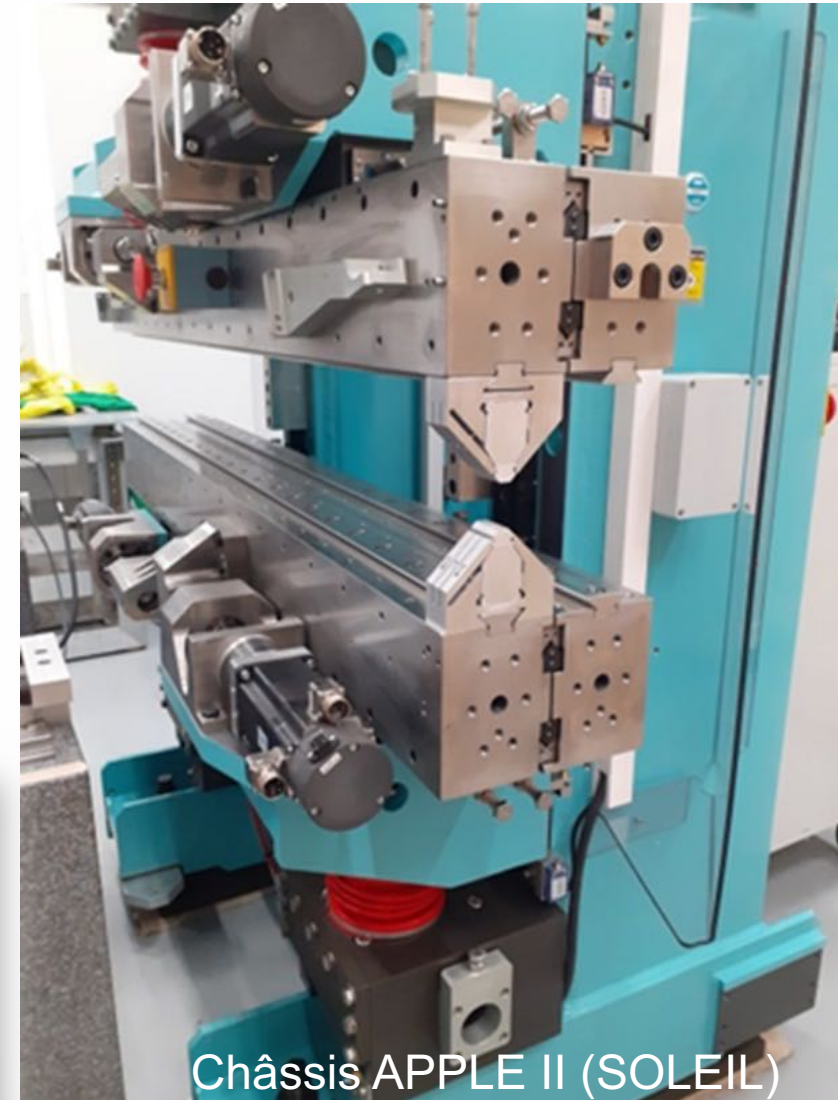
1x in vacuum wiggler
1x out of vacuum wiggler



PROTOTYPE d'un Onduleur Bipériodique

Carriage type	Existing APPLEII carriage
Permanent magnet grade	NdFeB
Operation mode	Mechanical shift: 0 mm \rightarrow λ_0 : 50 mm Mechanical shift: 0 mm \rightarrow λ_0 : 150 mm
Magnetization :	
• Period: 50 mm	Required 1.37 T (delivered: 1.38 T)
• Period: 150 mm	Required 1.37 T (delivered: 1.42 T)
Magnetic length	1500 mm
Minimum magnetic gap	14 mm
Maximum magnetic field at minimum gap	λ_0 : 50 mm \rightarrow 0.64 T λ_0 : 150 mm \rightarrow 0.53 T
Spectral range	λ_0 : 50 mm : 320 eV \rightarrow 1370 eV λ_0 : 150 mm 17 eV \rightarrow 450 eV

O. Marcouillé
A. Potet



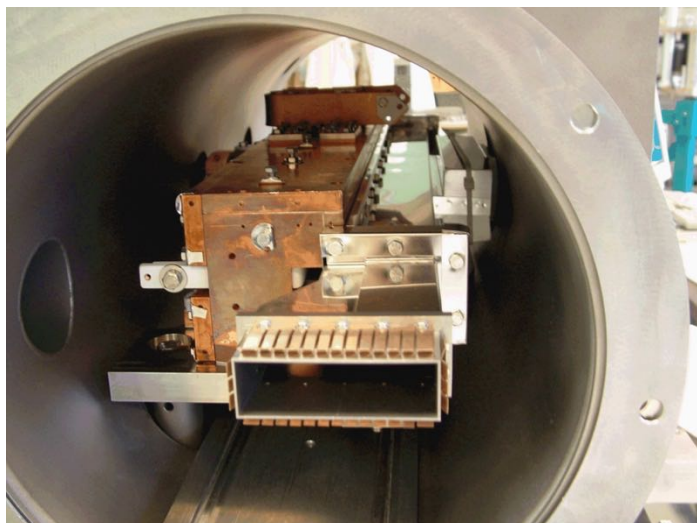
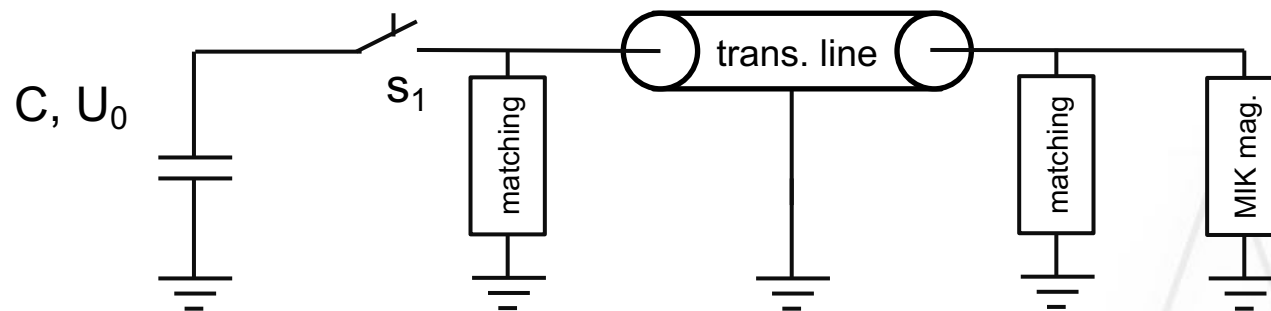
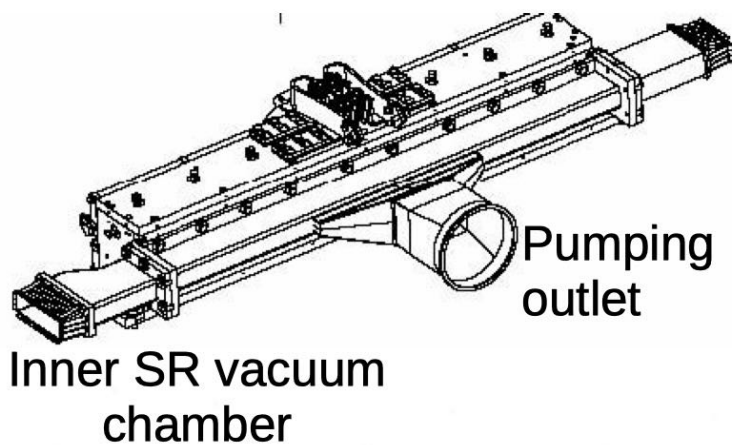
Outillage



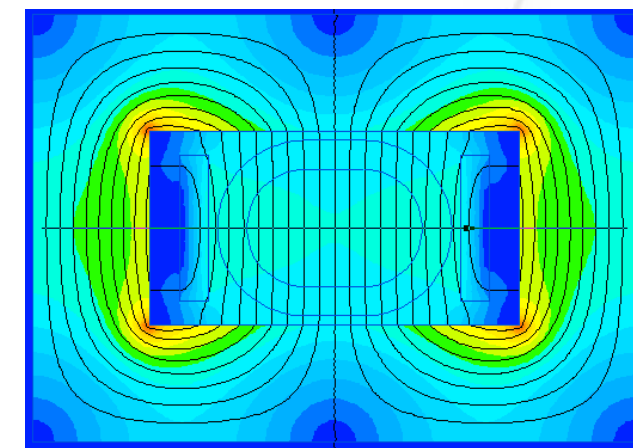
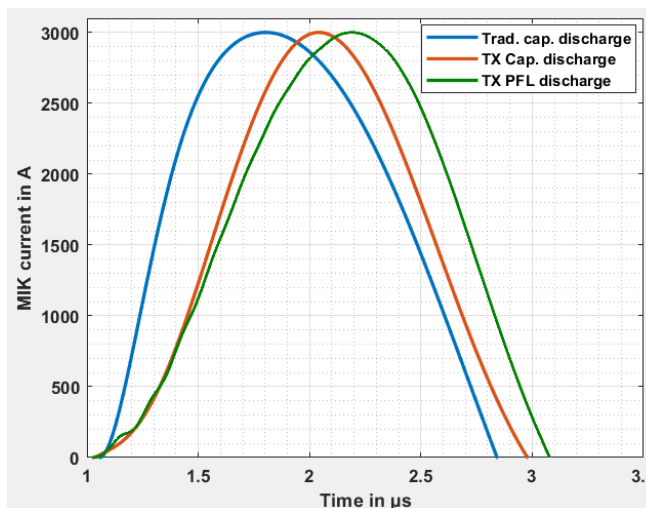
Aimants et supports

Les aimants rapides à faible champ rémanent

Expertise sur le développement des pulseurs



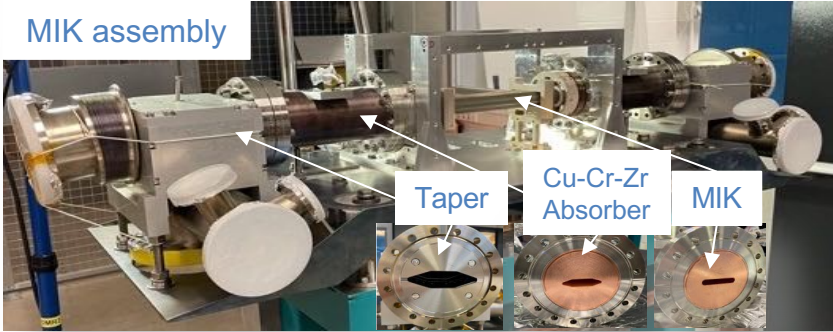
Septum Passif (SOLEIL)



Carte de champs

SOLEIL SOLEIL II

MIK assembly

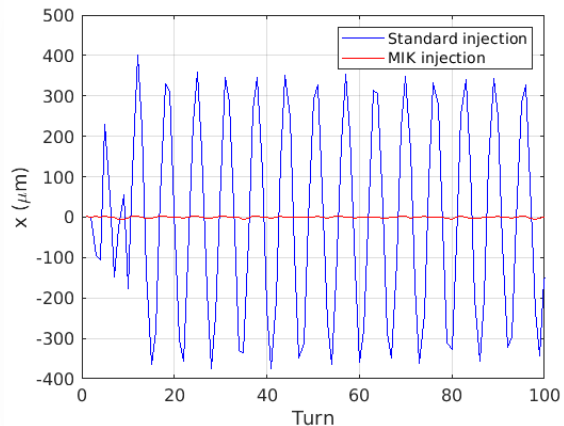


Efficacité d'injection maximale mesurée : 97%

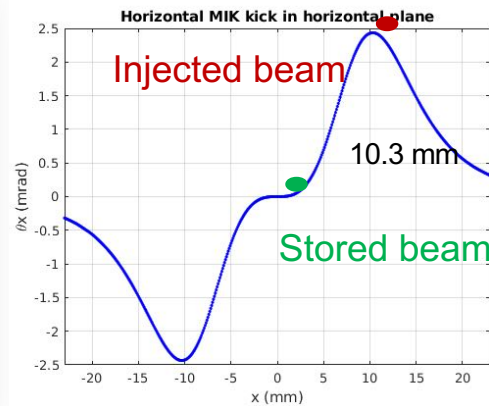
Perturbation de l'orbite fermée < 2% $\sigma_{x,y}$ (avec correcteur actif)

$$\Delta\sigma_x = 3.5\% \sigma_x$$

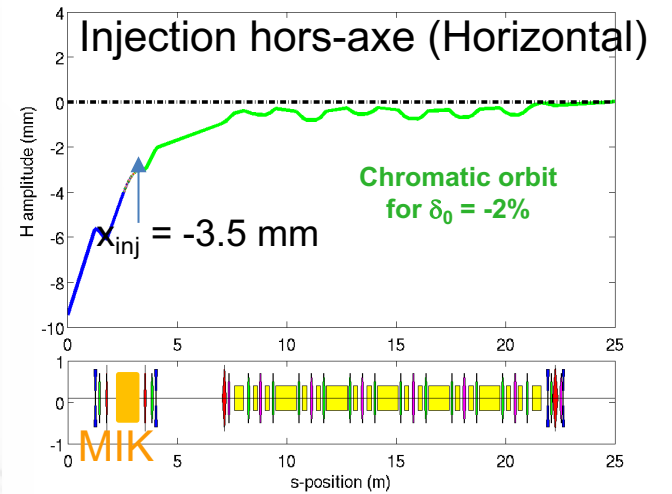
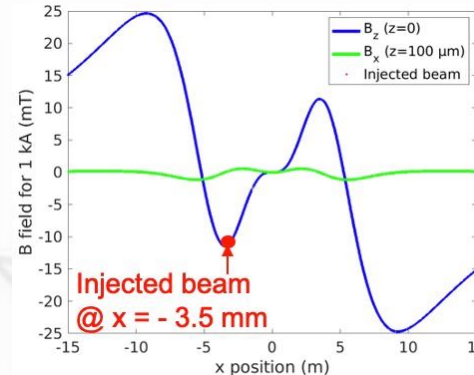
- Un nouveau MIK (Multipole Injection Kicker)
 - Prototype #2: MACOR
 - Test en tension / pulser : 16-18 mT pour 6.5 kV/2 kA
 - Etude thermique et conception mécanique
 - Simulation des effets transitoires
 - Prochaine étape : test sur un accélérateur
- Septum fin collaboration (CERN).



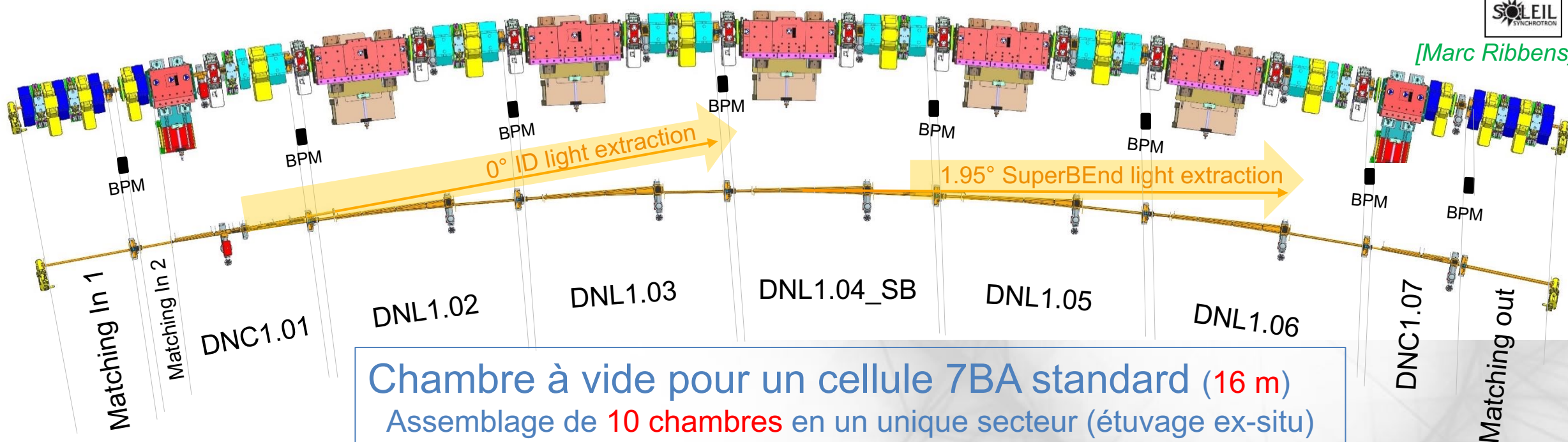
Hors vide



Sous vide



[Marc Ribbens]



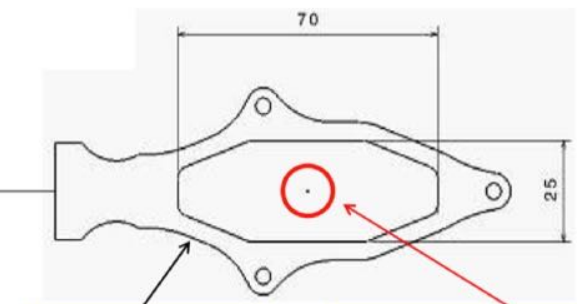
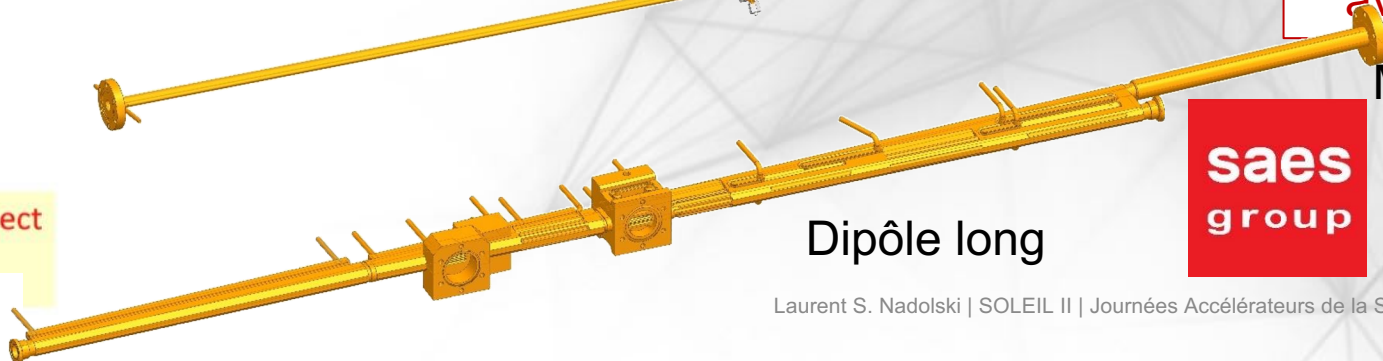
Chambre à vide pour un cellule 7BA standard (16 m)
 Assemblage de 10 chambres en un unique secteur (étuvage ex-situ)

Matériau :
 Cu-OFS ou CuCrZr
 avec dépôt de NEG

Section d'adaptation



Dipôle long



SOLEIL today
 Standard vac. Chamber
 Qpole, Spole

SOLEIL UPGRADE project
 center achromat
 Ø 12 mm interne

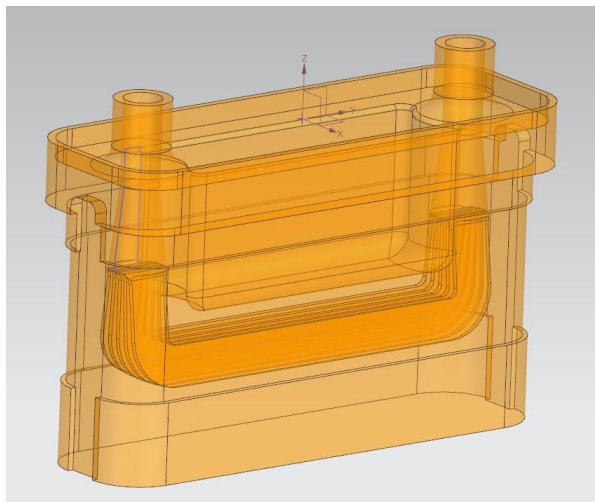


Marchés innovants



Preuve de Concept d'un Absorbeur Dipôle par Fabrication Additive

[Marc Ribbens ; Keihan Tavakoli]



Dans le cadre de de la collaboration avec SAES : exploration de l'impression 3D pour les absorbeurs crotch des dipôles (tout en conservant la conception mécanique standard)

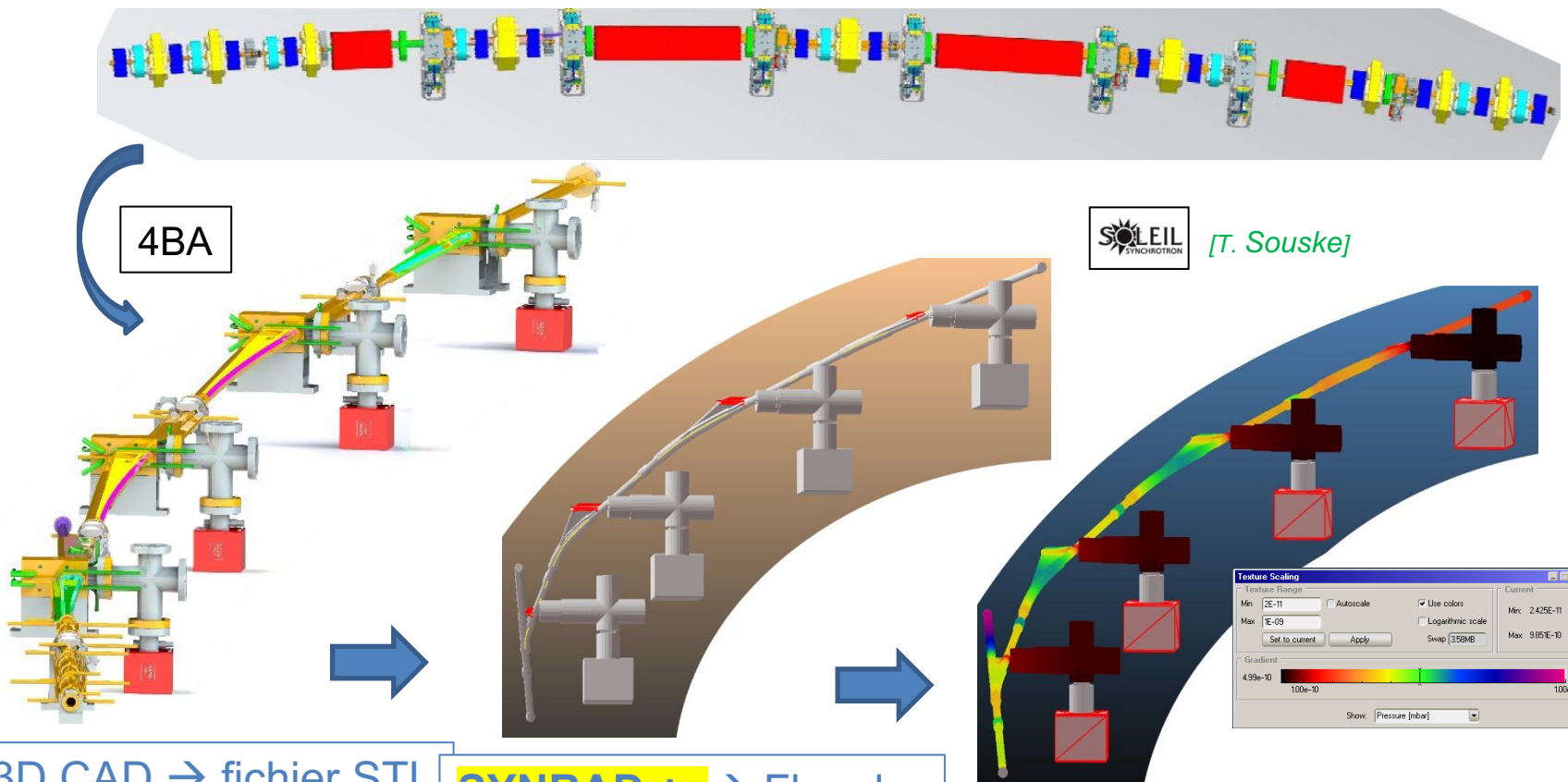


2 x "blocs **CROTCH**" ont été déjà réalisés en **CuCrZr** par GKN Additive

Prêts à être usinés.

Des tests de vide, d'usinage de surface et de soudage sont prévus avec le groupe SAES

SIMULATIONS



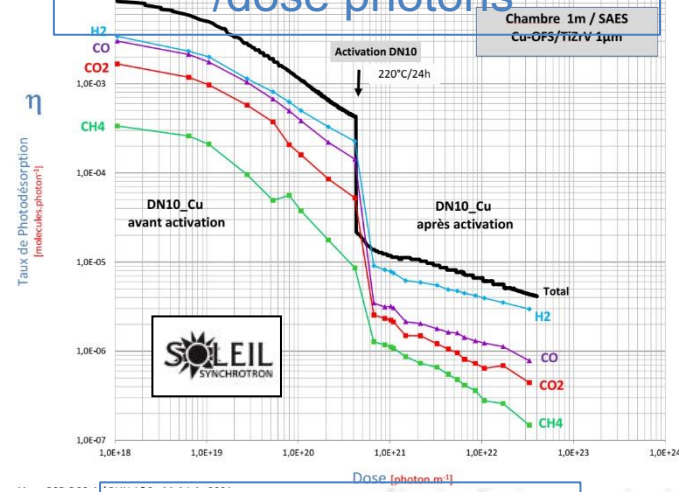
3D CAD → fichier STL
Achromat 4BA

SYNRAD+ → Flux de photon sur les parois

MOLFLOW+
→ Pressions partielles H₂ CO CO₂ CH₄

Sans prise en compte de la réflectivité du NEG et de sa structure

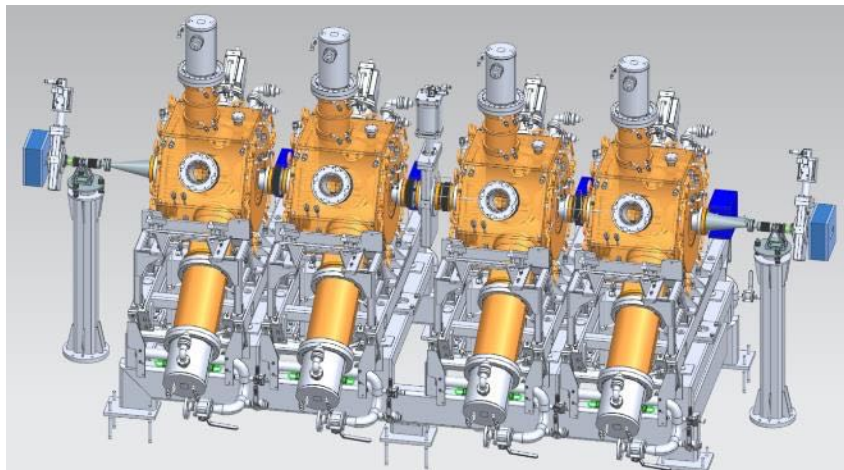
Données SOLEIL pour la photo-désorption
PSD taux η /dose photons



Dépôt NEG sur 100% de l'anneau

Premières simulations sur un seul gaz → CO

VacuumCOST program "Benchmarking"

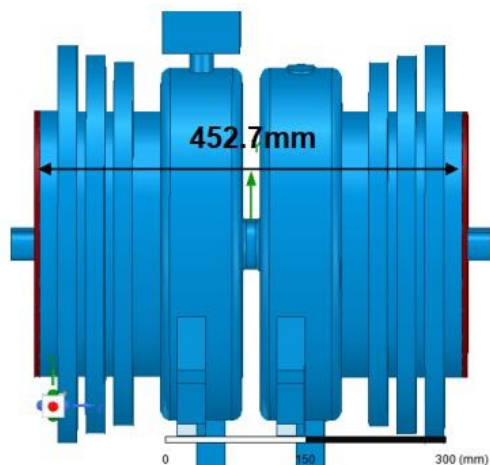


Cavités fondamentales ESRF-EBS

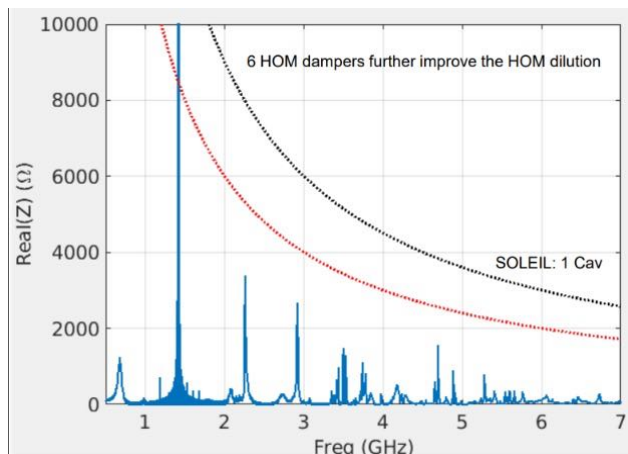


2 x 60 kW BOO amplifiers

2-cell cavity
 $R_s = 2.4 \text{ M}\Omega / \text{cav}$
 $Q_0 = 36\,000$
 $R/Q = 65 \text{ }\Omega / \text{cav}$
 $N_{\text{cav}} = 1$



Systeme harmonique
 SOLEIL/ESRF

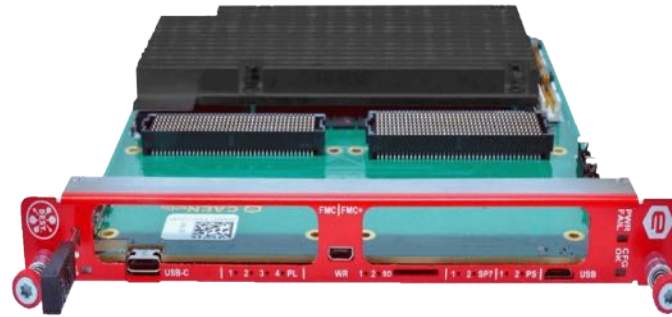


AC/DC converter voltage remote control allows to match for maximum efficiency over the whole power range (impossible presently: components set to reach max efficiency only at max power – 1dB compression)

μTCA platform



Digital processor on μTCA crate



RF interface (frequency translation to 10 MHz)

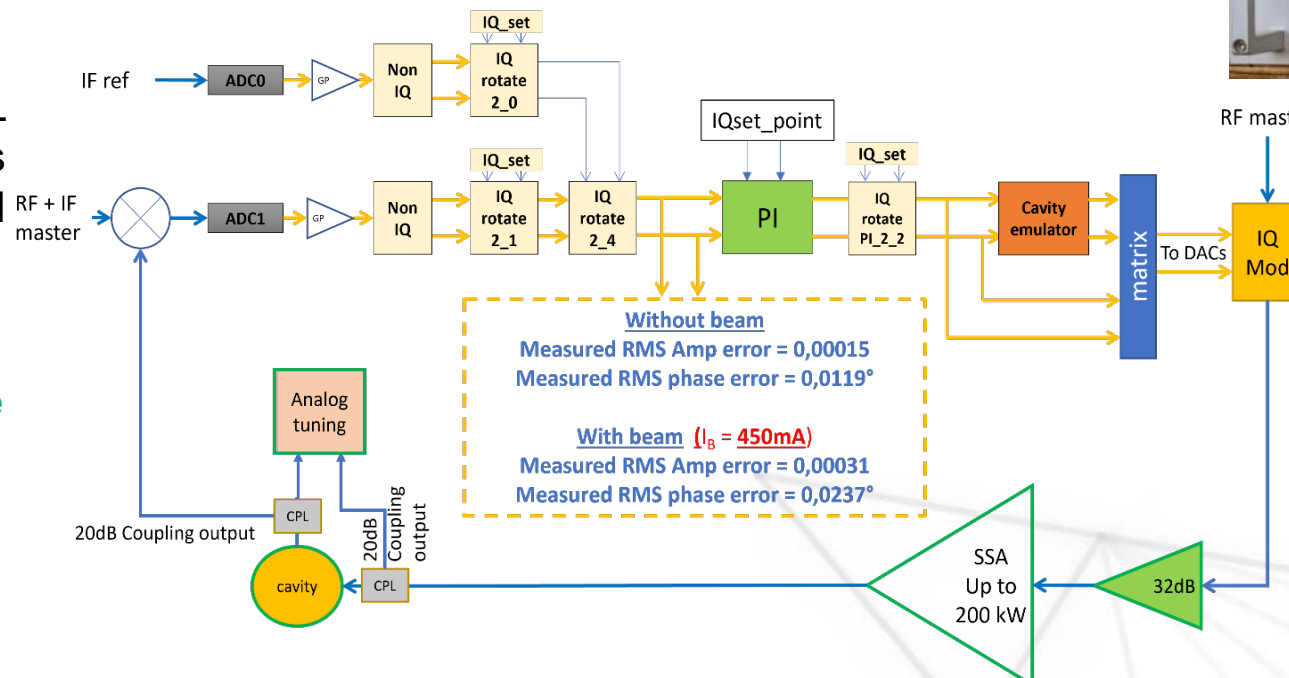


ADC/DAC module + FMC

Experimental results:

First test on one of SOLEIL cavity with stored beam is a full success. The closed loop accuracy is :

- 3×10^{-4} in amplitude
- $2.4 \times 10^{-2}^\circ$ rms in phase



SSA
Up to
200 kW

32dB

RF master

RF interface (frequency translation to 10 MHz)

IQ Mod

To DACs

matrix

Cavity emulator

PI

IQ rotate PL_2_2

IQ rotate 2_4

IQ rotate 2_1

Non IQ

GP

ADC1

RF + IF master

IF ref

ADC0

GP

Non IQ

IQ rotate 2_0

IQ_set

IQ_set_point

20dB Coupling output

20dB Coupling output

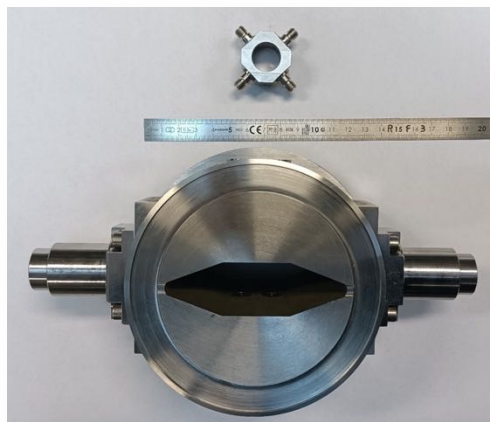
cavity

CPL

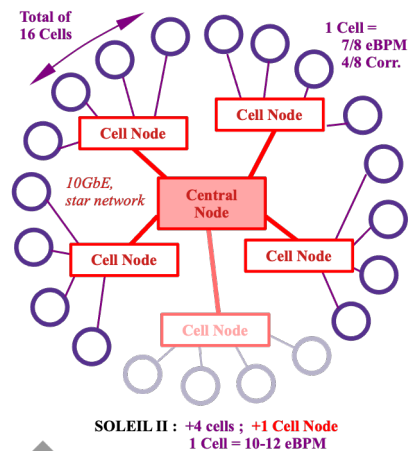
Analog tuning

CPL

20dB Coupling output

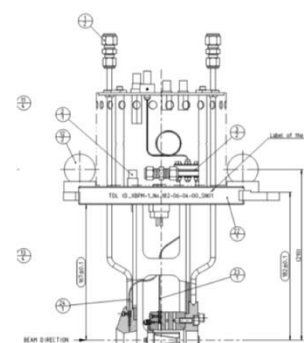
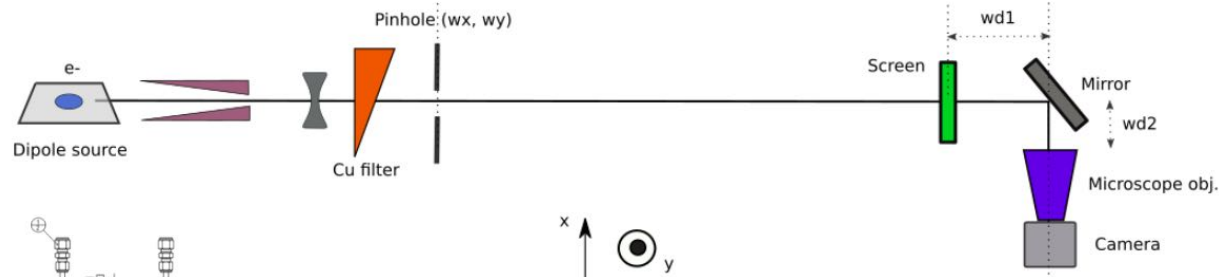


BPM de SOLEIL (bas) et BPM prototype SOLEIL II (haut)

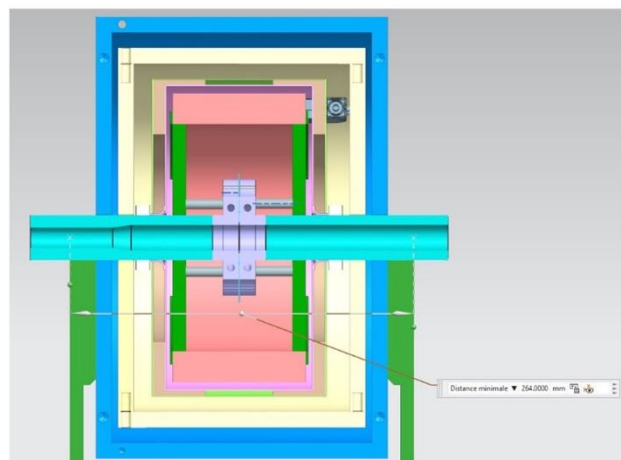
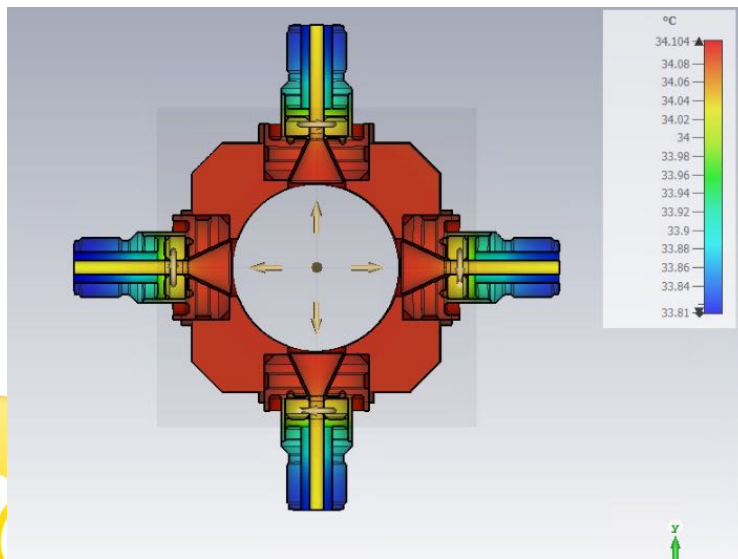
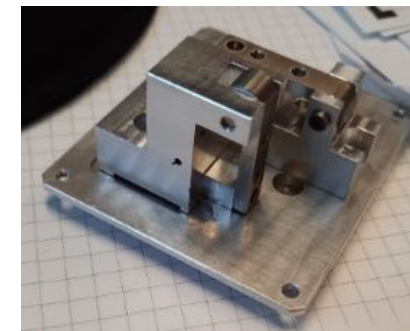


SOLEIL II : +4 cells ; +1 Cell Node
1 Cell = 10-12 eBPM

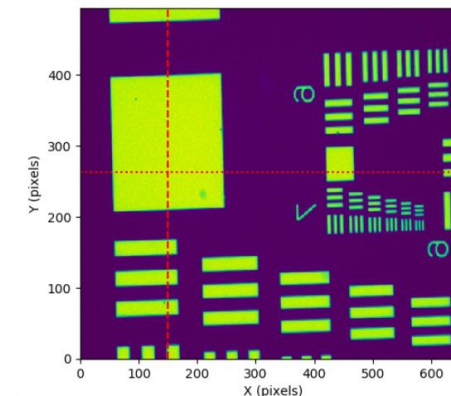
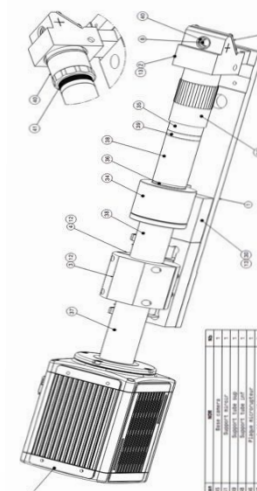
Figure 1 - Proposed two level star topology. As SOLEIL II increases the number of systems, the network will expand by adding a Cell Node.



XBPM

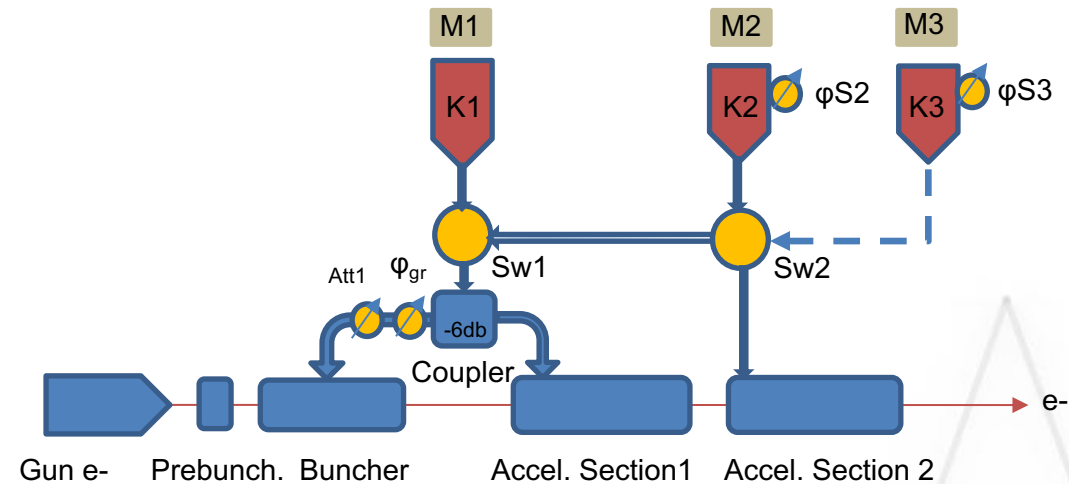
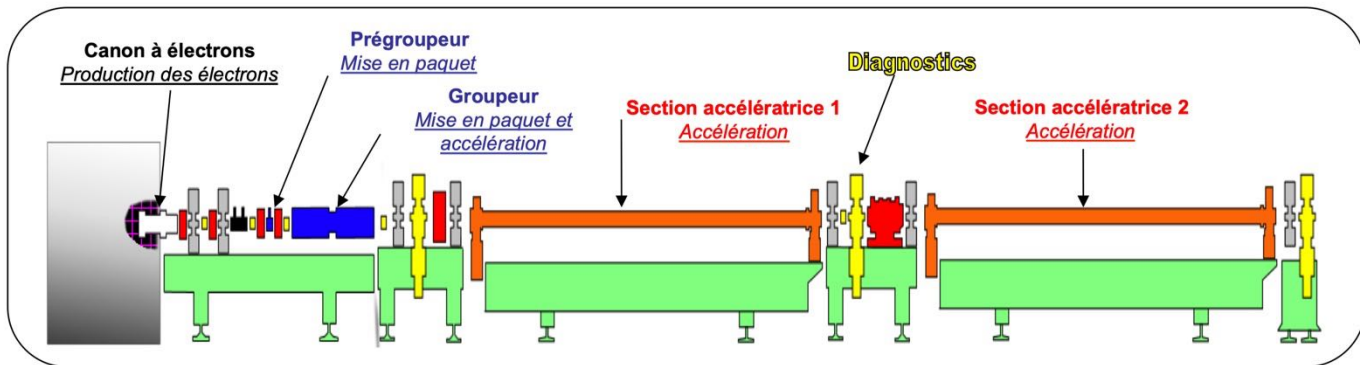


Mechanical integration of the DCCT
Courtesy F. Lepage and A. Le Jollec

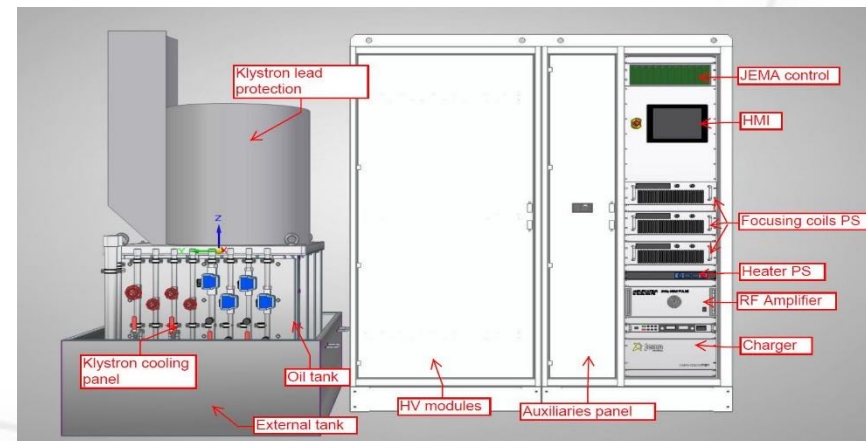


μ-imager prototype: setup and calibration image.

SOLEIL: LINAC 110 MeV

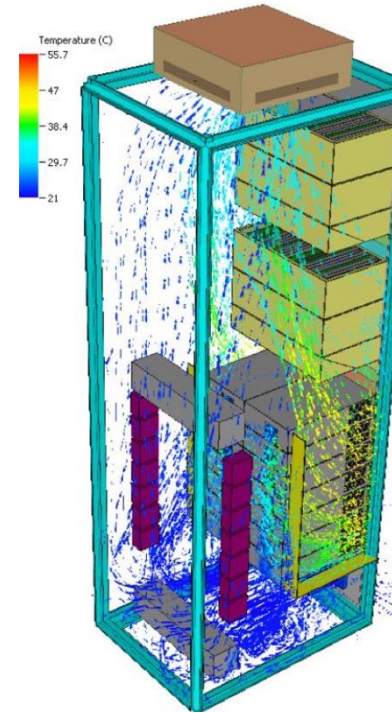


Vue de LINAC de SOLEIL



Moduteur JEMA-ENERGY (2024)

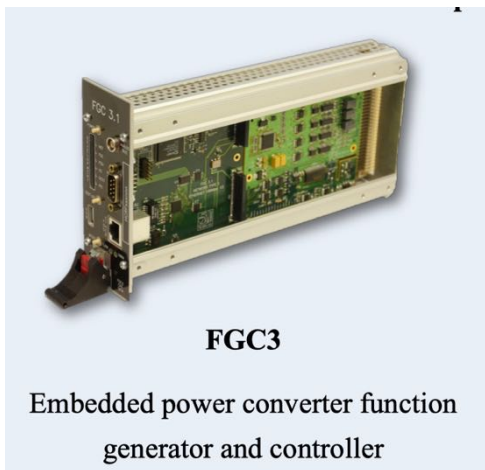
Magnet	Gap (mm)	I _{max} (A) ; V _{max} (V)	Power Supply type	Numb. of PS
Sextupoles	16	55A ; 7V	1Q 80A 800W	389
	21	100A ; 9V	1Q 100A 1500W	23
Octupoles	19	10A ; 1V	4Q 20A 150W	180
			4Q 20A 150W or 4Q 40A 300W	
Normal + skew quadrupolar correctors inside octupoles	TBD *	TBD	4Q 40A 300W	> 316
	19	±38A ; ±1V	4Q 40A 300W or 4Q 80A 600W	
Individual quad correctors	TBD *	TBD	4Q 40A 300W	232
H & V slow correctors	16 / 21	±20A ; ±6V	4Q 20A 150W	> 180x2
H & V fast correctors	20	TBD	4Q 10A 100W High BW	> 44x2
Overall total				> 1590



Power converter cards



DCCT + FGC interface cards



FGC3

Embedded power converter function generator and controller

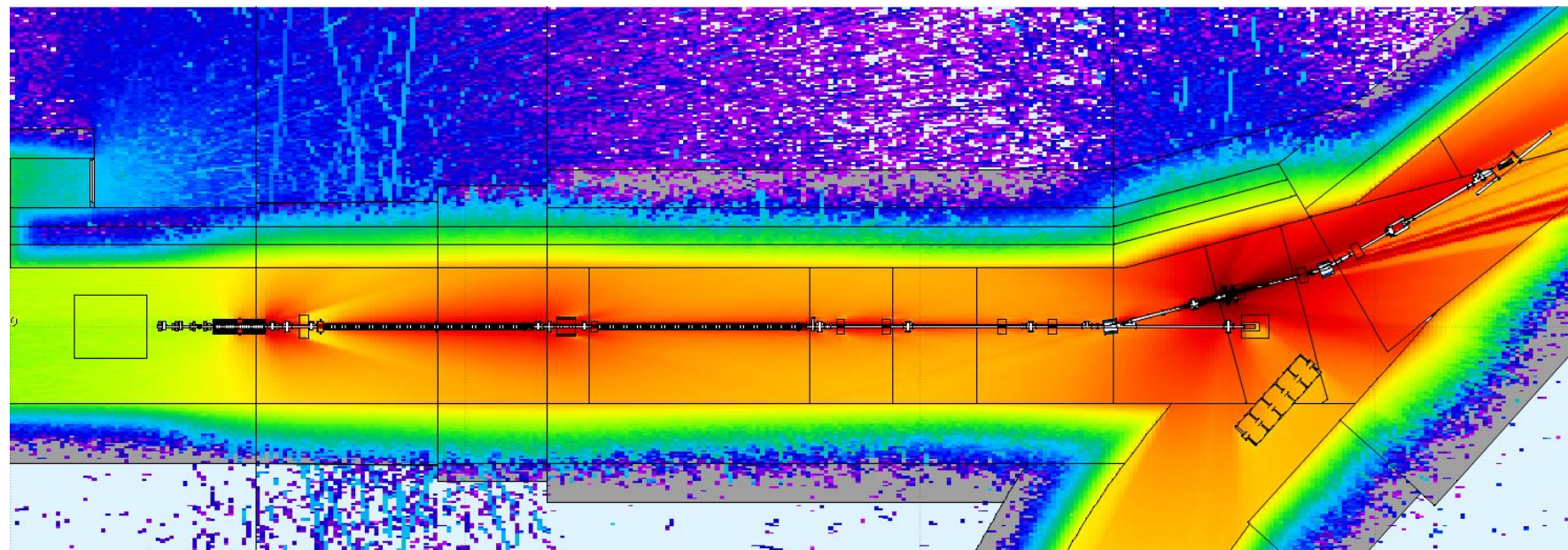
Collaboration avec le CERN sur la plateforme FGC3 de contrôle/régulation pour alimentations

Calculs Monte-Carlo
FLUKA : Rayonnement

Dimensionnement
blindages, etc.

Systemes RP, PSS

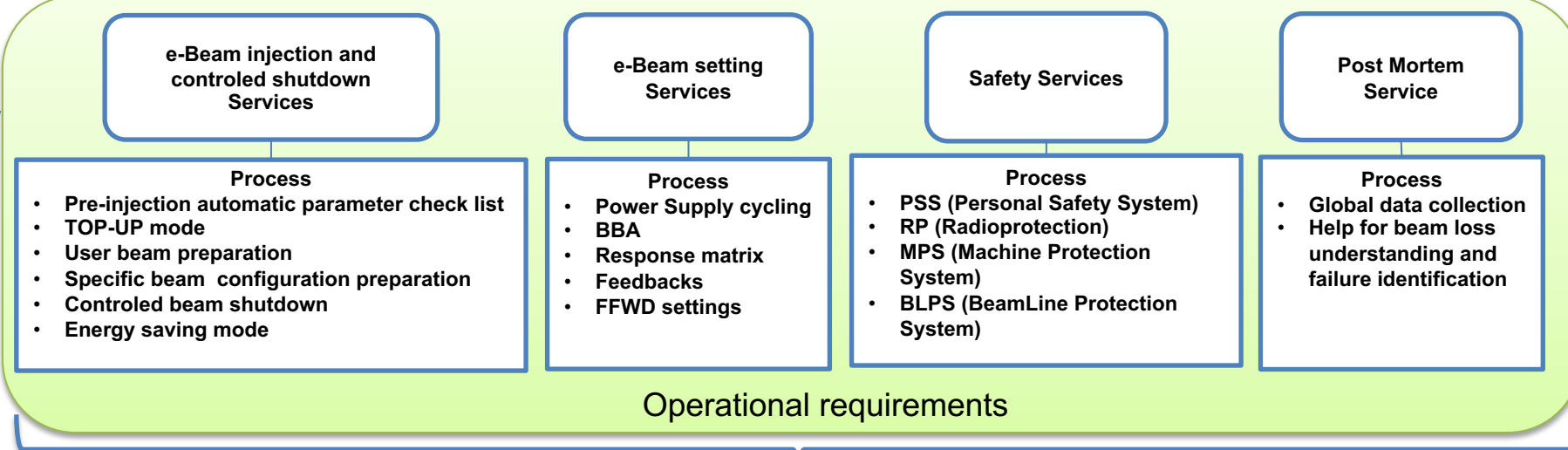
LINAC, booster, anneau,
lignes de lumière



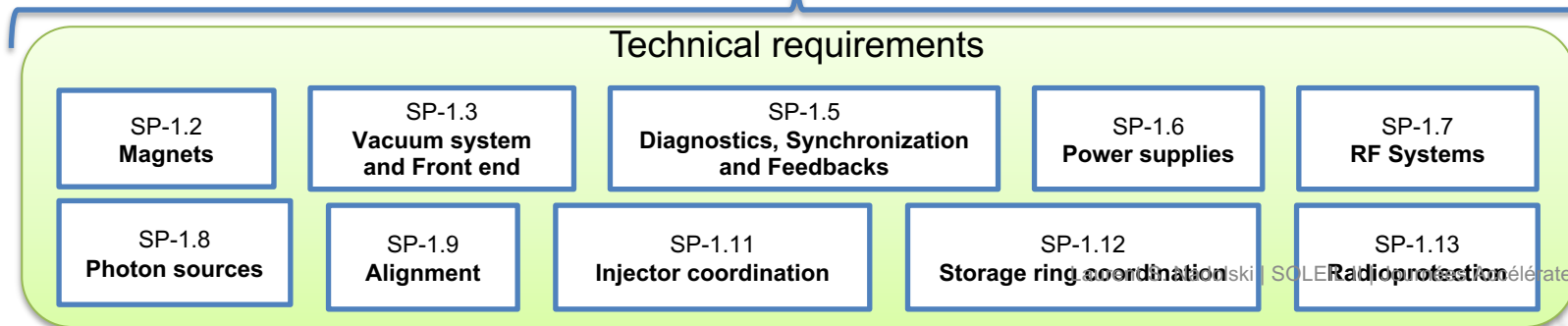
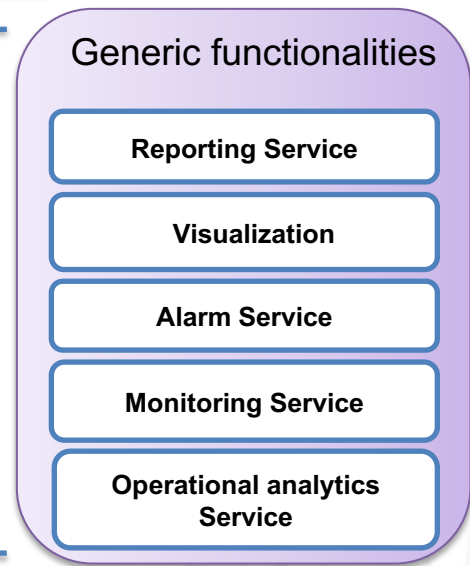
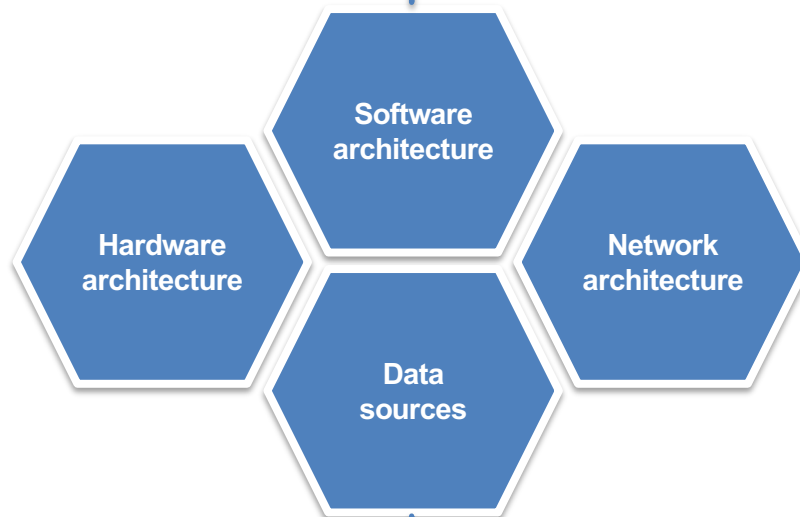
Projet 150 MeV LINAC



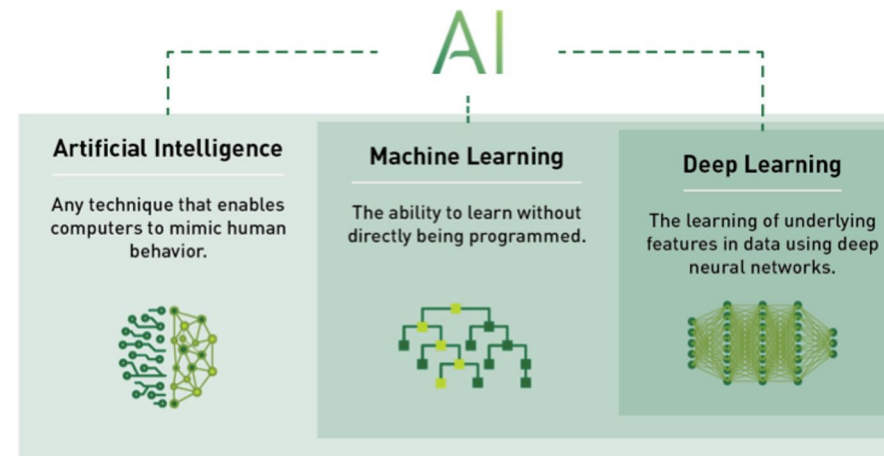
Mesure RP et tri pour la filière déchet
Plusieurs années (3-5 ans)



Smart Systems ←



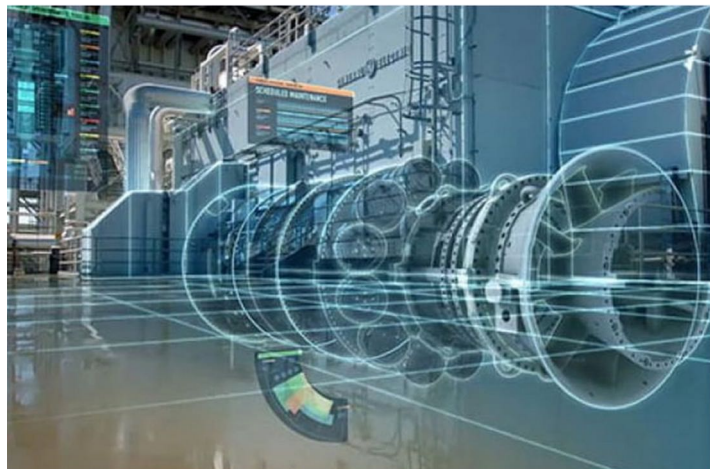
L'Intelligence Artificielle au Service des Accélérateurs



- **L'automatisation et le contrôle** : utiliser des **corrections en ligne** avec algorithmes d'optimisation pour explorer l'espace des paramètres, établir les points de fonctionnement optimum et maintenir les performances des accélérateurs.
- **Les diagnostics faisceau et l'analyse de données** : utiliser des méthodes employant le Machine Learning pour analyser et extraire les informations utiles pour les accélérateurs et les lignes de lumière ; aide à la **décision pour les opérateurs**.
- **Détection d'anomalie et maintenance prédictive** : identifier les origines principales des **dysfonctionnements naissant ou avérés** des accélérateurs en analysant le flot de données stockées en continue par les bases de données afin d'aider l'opérateur dans ses diagnostics, prédire les futurs dysfonctionnements majeurs et définir les **maintenances prioritaires** pour les accélérateurs et les systèmes matériels et logiciels (équipements & infrastructure de contrôle-commande).
- **Simulation et optimisation des domaines des Accélérateurs** : Construire des **modèles complets** des accélérateurs en utilisant des modèles numériques (**MOGA, PSO...**), l'apprentissage profond (**Deep Learning**) afin d'optimiser les performances des accélérateurs.

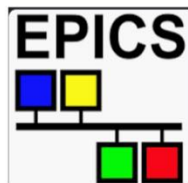
Collaboration internationale (sources de lumière)

IA (DIGITAL/LEAPS, pyCAST, ARTIFACT)



Jumeau numérique

```
>>> switch_to_hardware()
```



Operation phase



Python Digital-Twin

The python digital twin would provide a long term solution in an open source license free environment:

- Simplified collaborative development, integrate modern CI/CD approach
- Clean and simple installation procedure
- Easy to interface with others recent developments using modern techniques such as advanced correction algorithms (pySC) or AI/ML optimizers (Badger/Xopt) and HPC implementation of pyAT (MPI/GPU)
- Clear automatically generated documentation
- Works for any accelerator (ring, linac, transfer lines) and control systems

Most used language in the world
Free and open-source
Very large users/developers community
Huge number of scientific libraries



Development phase

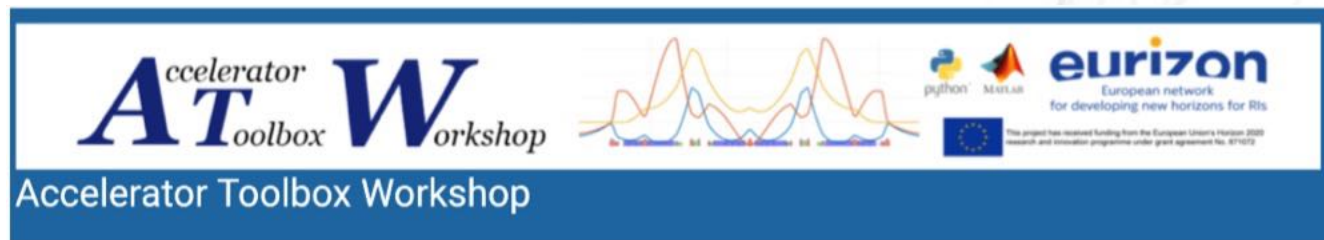
Python Accelerator Toolbox simulations



```
>>> switch_to_physics()
```



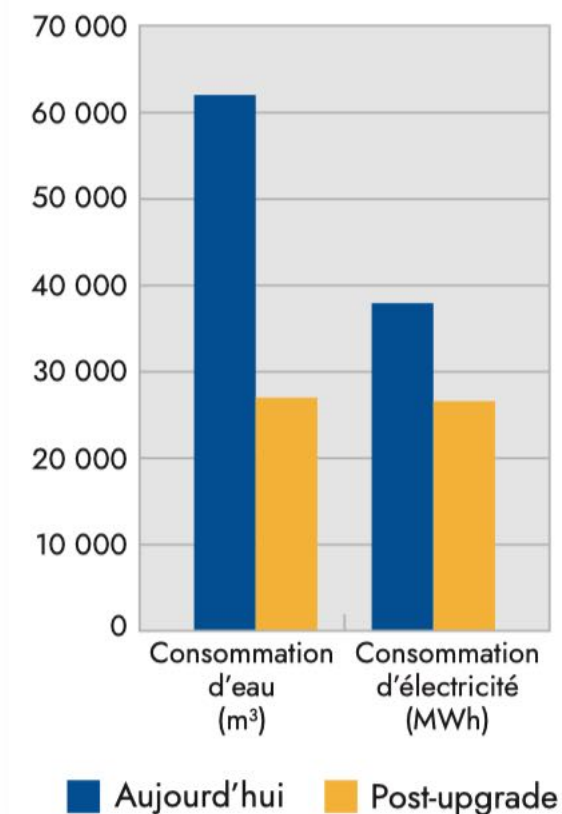
Calcul HPC



- **Projet d'upgrade: injecteur ESRF-EBS / SOLEIL II (ANS/BOO, IT, BL2)**
 - Focus sur la sobriété énergétique et réduction des empreintes carbone
- Grande richesse de domaines théoriques, technologies et pratiques
- **SOLEIL / ESRF**
 - Laboratoires d'innovation
 - Plateformes de test des accélérateurs
 - Laboratoires / bancs de mesures
 - Lignes de lumière
- Formation des générations futures (jeunes, masters, doctorants, etc.)
- Innovation et partenariat avec les industriels
- De nombreuses opportunités pour des collaborations riches

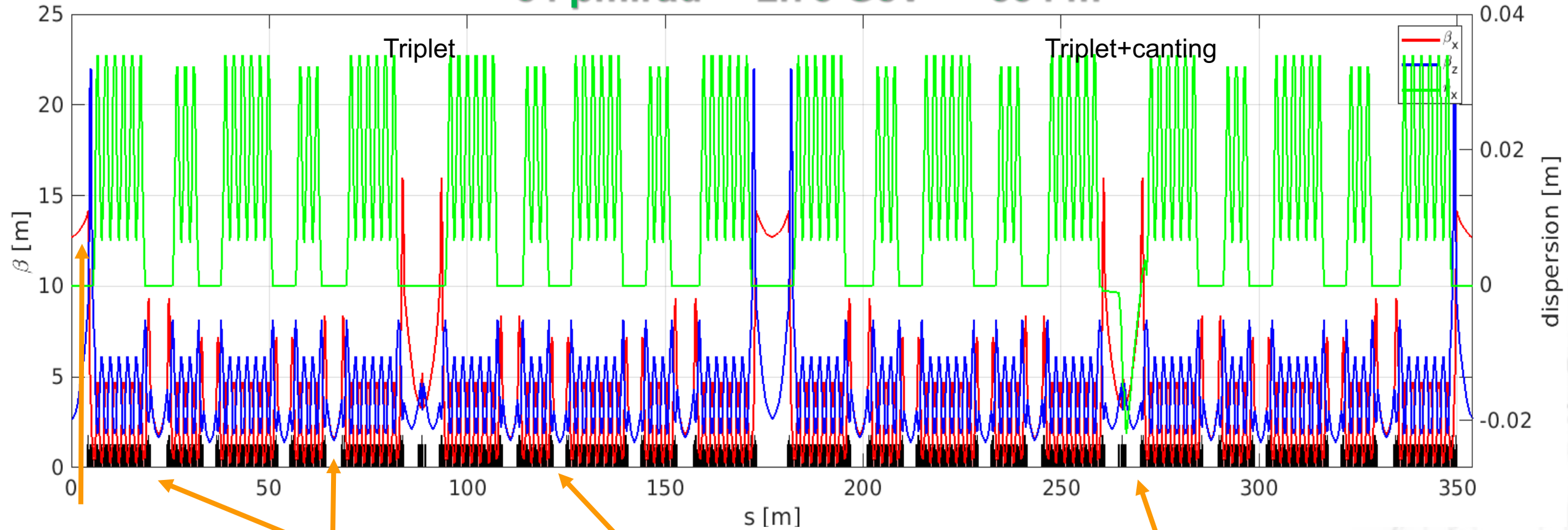
Utilisation raisonnée de l'énergie

Évolution de la consommation électrique et en eau.



Annexes

84 pm.rad 2.75 GeV 354 m



Injection
 $\beta_x \sim 12.8 \text{ m}$
 $L = 7.35 \text{ m}$

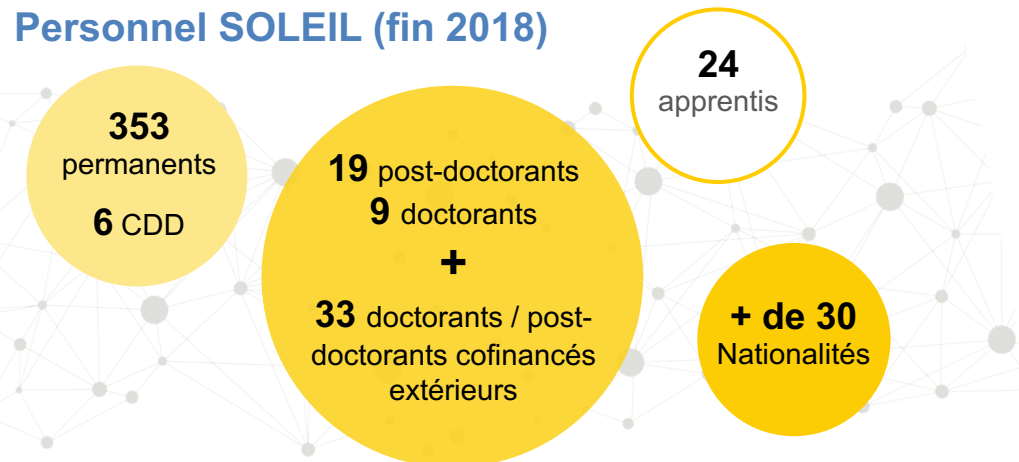
Section moyenne
 $\beta \sim 1.5 \text{ m}$
 $L = 4.2/4.7 \text{ m}$

Section courte
 $\beta \sim 1.4 \text{ m}$
 $L = 3.1 \text{ m}$

Section cantée (9 m)
 Ajout d'une chicane et d'un triplet
 de quadrupôles



Personnel SOLEIL (fin 2018)



Budget total de construction → 505 M€

Budget annuel → ~63 M€



72%



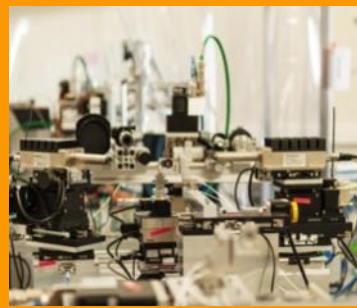
28%

SOLEIL est une structure autonome et emploie un large spectre de profils métiers (scientifiques, techniques, administratifs, ...)

1. Qualité de l'accueil



2. Performance des sources et des lignes de lumière



3. Reconnaissance nationale et internationale de la recherche propre



Ouvert aux utilisateurs depuis **2008**

Provenance des utilisateurs
65% de France
29% de l'Union Européenne
6% du reste du monde

4 414 passages d'utilisateurs

29 Lignes de lumière

500 mA courant maximum

2 519 utilisateurs (individus) venant de **973** laboratoires

5 000h/an pour les lignes
 Disponibilité **98,7%**
 Temps Moyen entre 2 pannes (MTBF) **92 heures**

1 245 projets soumis
746 acceptés

104 Partenariats Scientifiques en cours

667 Publications scientifiques
122 avec un Facteur d'Impact (IF) > 9
87 utilisant plusieurs Lignes de lumière

24 projets Agence Nationale de la Recherche (ANR) en cours

4. Ouverture vers le monde industriel



5. Engagement sociétal et formation

