

LUNEX5 : un démonstrateur de laser à électrons libres avancé

M. E. Couprie, A. Loulergue, P. Morin, pour l'équipe projet

Laser à électrons libres **U**tilisant un accélérateur **N**ouveau pour **E**xploitation de
rayonnement **X** de **5**^{ème} génération

free electron **L**aser **U**sing a **N**ew accelerator for the **E**xploitation of **X**-ray radiation of **5**th
generation

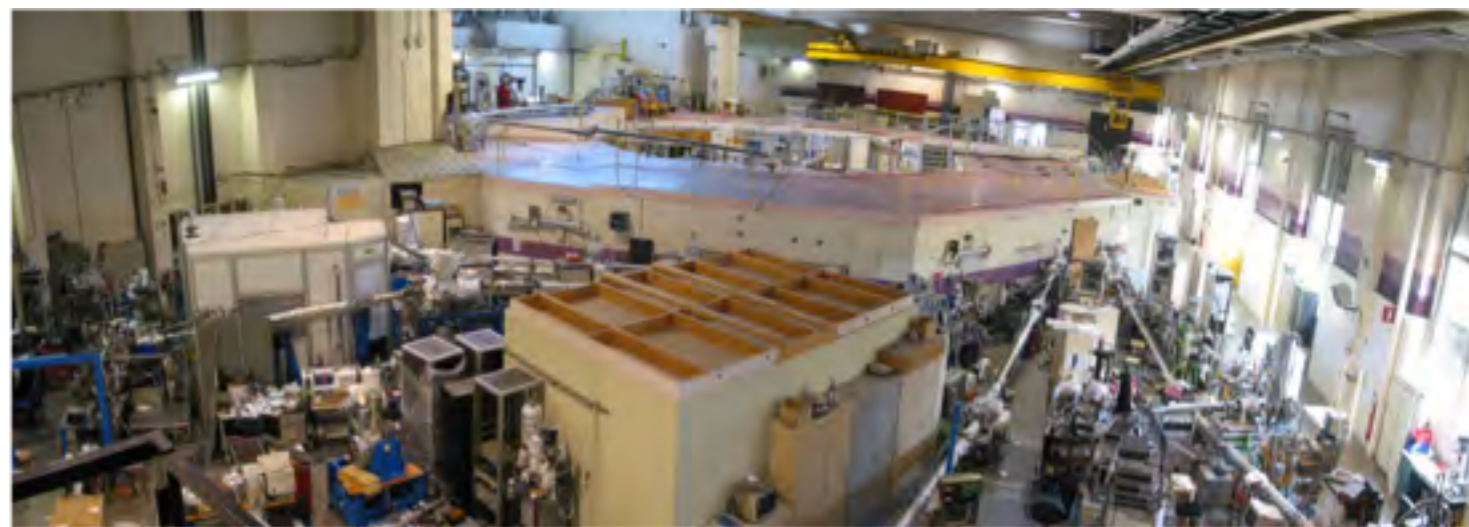
Source de lumière sur accélérateur

Première génération (~1980) :
Utilisation parasite du rayonnement synchrotron



Ex : ACO

Seconde génération (~1985-2020...) : Anneaux dédiés pour le rayonnement synchrotron, quelques onduleurs et wigglers, émittance de quelques mm.rad



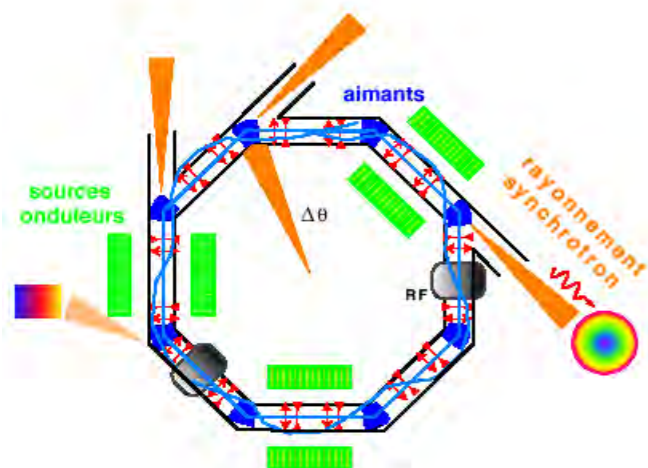
Troisième génération (~1990-..) : faible émittance, grand nombre d'ID, cohérence transverse partielle, évolution vers USR, usage de monochromateur pour sélection spectrale, nombre de photons réduits en fs (slicing, low-alpha)



Source de lumière sur accélérateur

Quatrième génération (2000-...) : impulsions courtes (fs) avec des ERLs et des Linacs, cohérence transverse et longitudinale par le laser à électrons libres

Anneau de stockage



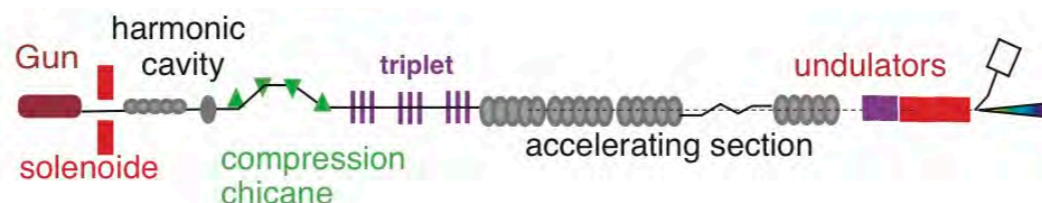
10–30ps, $\epsilon\alpha E^2$

Dispersion en énergie : 0.1 %, MHz



Ex : Super-ACO, ELETTRA, UVSOR...

Accélérateur linéaire



10 fs–10 ps, $\epsilon\alpha I/E$

Dispersion en énergie : 0.01 %

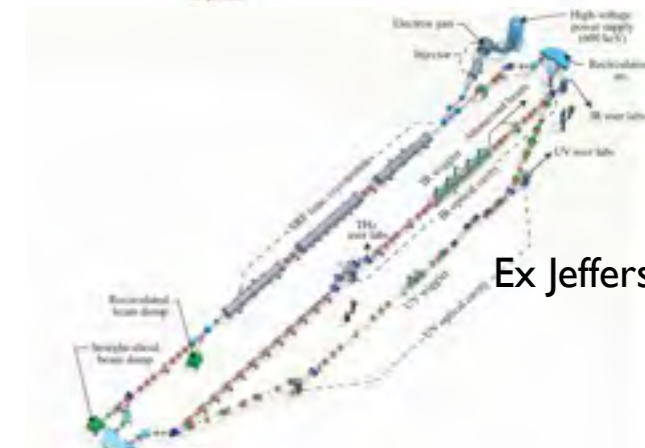
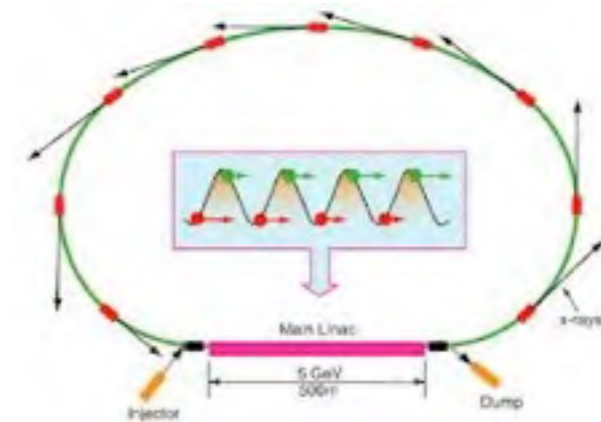
Taux de répétition : dizaine de Hz–MHz (selon le linac)



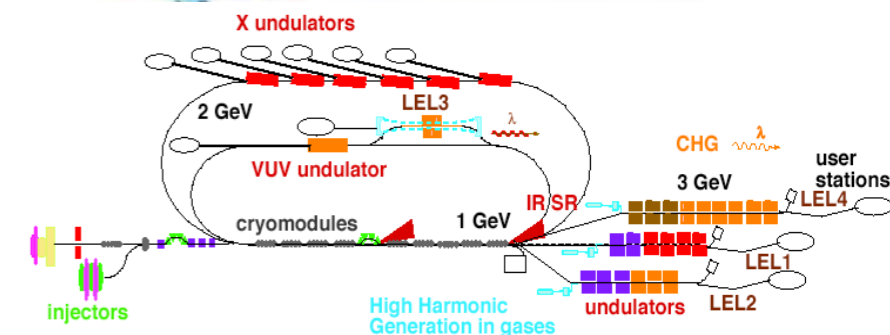
Ex FLASH

Energy recovery Linac (ERL)

M.Tigner Nuovo Cimento 1965

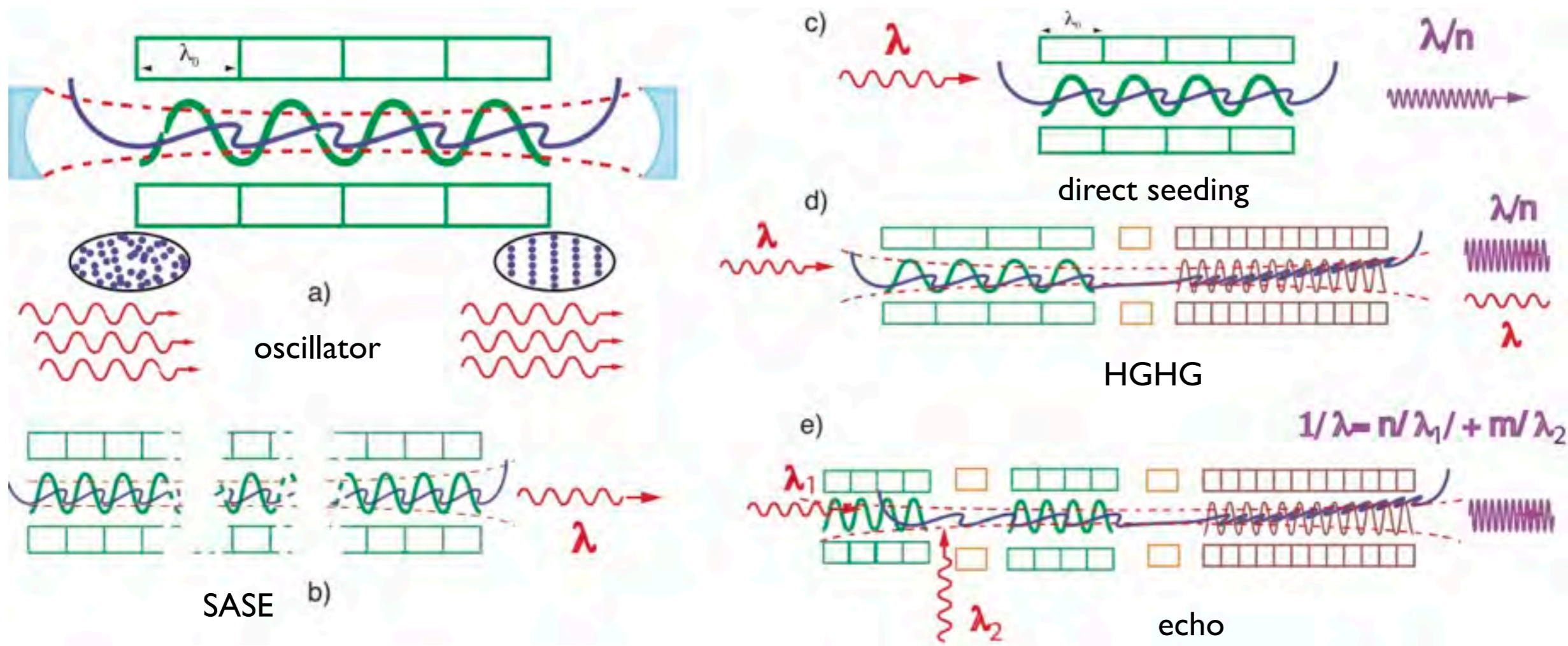


Ex Jefferson Lab



Ex ARC-EN-CIEL

Principe du laser à électrons libres

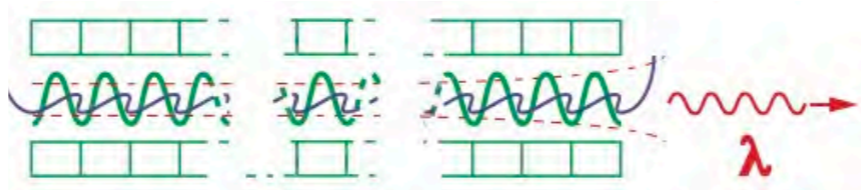


$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad K = 0.94 \lambda_0 (\text{cm}) B_0 (\text{T}) \quad G \propto L_{\text{ond}}^2 / \gamma^3$$

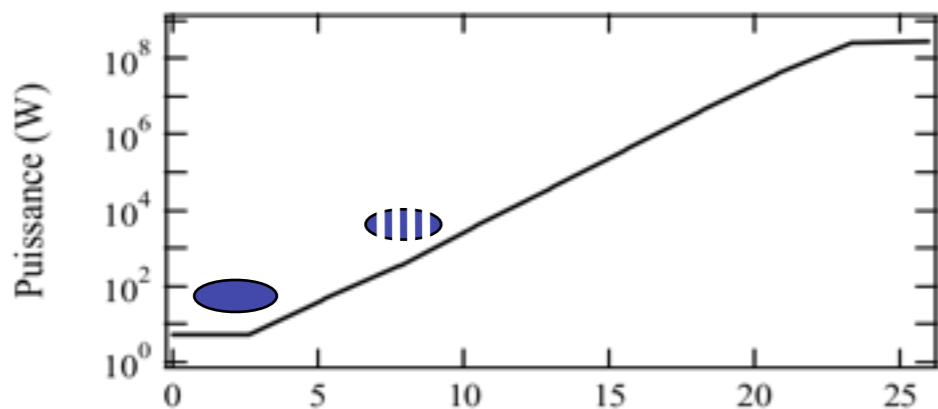
- **interaction onde optique** (émission spontanée, stockée, source laser externe) accordée sur le fondamental λ de l'onduleur
- **échange d'énergie** entre l'onde et les électrons et **mise en micro-paquets** séparés par λ
- **émission cohérente et amplification**
- **saturation** (augmentation de dispersion en énergie du paquet, condition de résonance insatisfaite)

Les configurations laser à électrons libres

SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) pas d'interaction electron-laser



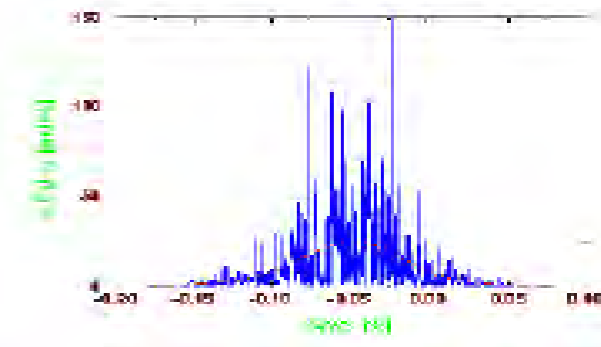
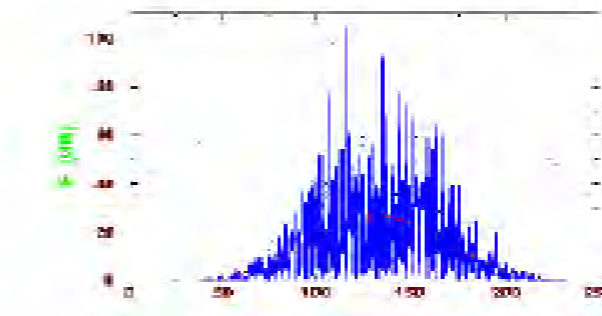
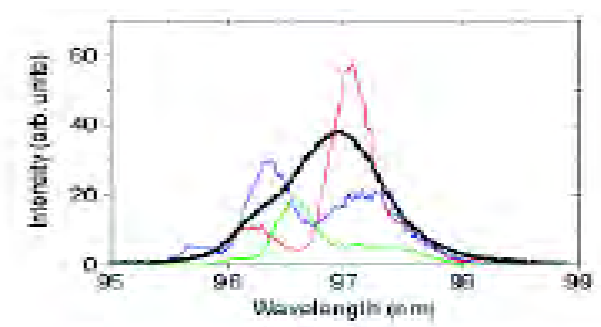
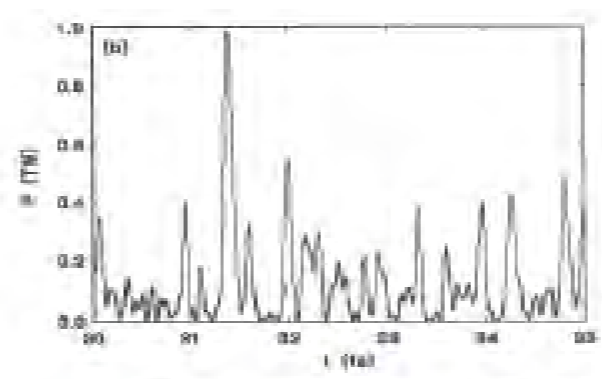
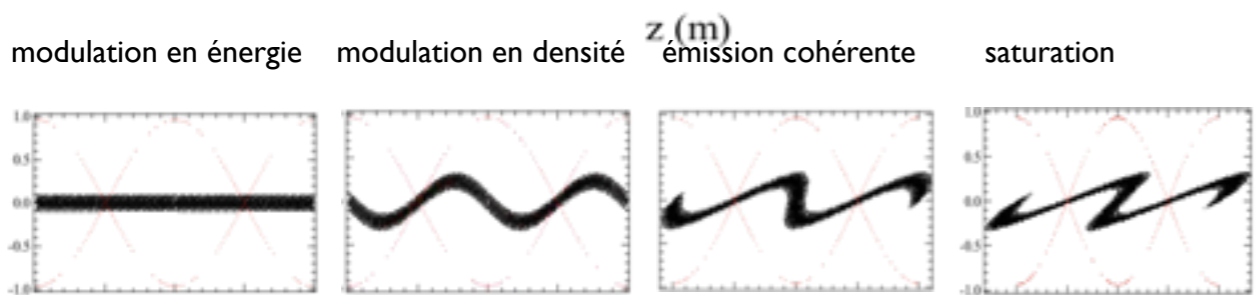
R. Bonifacio et al, *Opt. Comm.* 50, 1984, 376, K. J. Kim et al, *PRL* 57, 1986, 1871, C. Pellegrini et al, *NIMA* 475, 2001, 1, A.M. Kondratenko et al, *Sov. Phys. Dokl.* 24 (12), 1979, 989
L. Giannessi et al., *Phys. Rev. Lett.* 106, 144801 (2011)
S. Reiche et al., *NIMA* 593 (2008) 45-48



$$L_g = \frac{\lambda_o}{4\sqrt{3\pi\rho}}$$

$$\rho = \frac{1}{4\pi\gamma} \left[\frac{2\pi^2}{\sigma_t} (JJ\lambda_o K)^2 \frac{I}{I_A} \right]^{1/3}$$

- courte longueur d'onde (gamme de 1 Å)
- bonne cohérence transverse => source d'électrons de faible émittance,



7-10 ordres par rapport au rayonnement synchrotron spontané
impulsions mille fois plus courtes que 3G

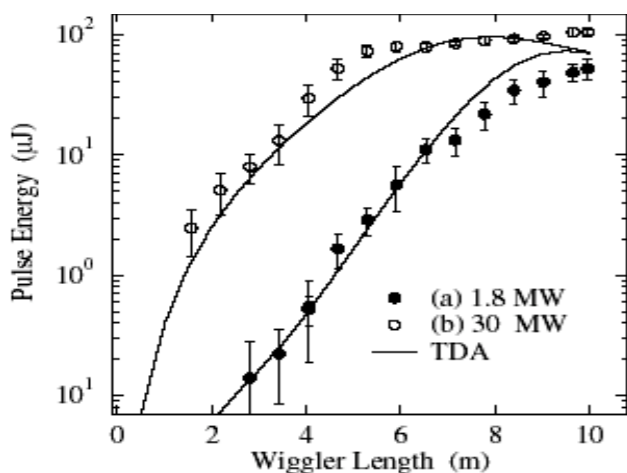
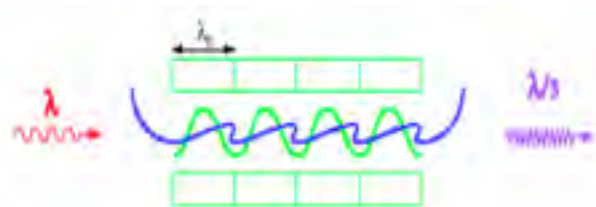
Les configurations laser à électrons libres

Seeding : une interaction électron-laser

- Réduction de la longueur de saturation => coût et taille réduits

- Réduction des fluctuations d'intensité et du jitter => expériences pompe-sonde

- Amélioration de la stabilité (longueur d'onde) et rétrécissement spectral



L. H. Yu et al, PRL 91 2003, 074801

L. H. Yu et al, Science 289, 2000, 932

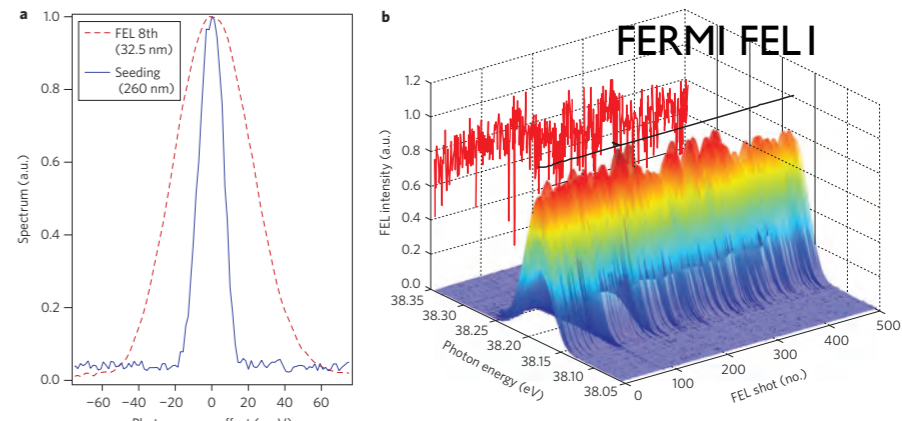
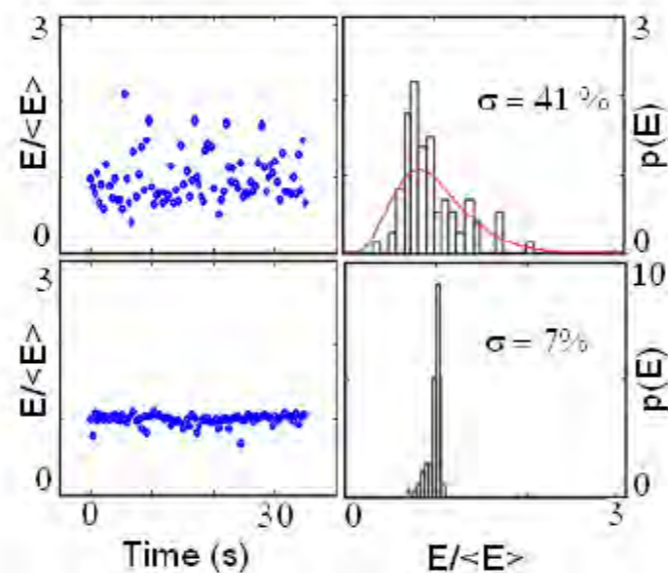
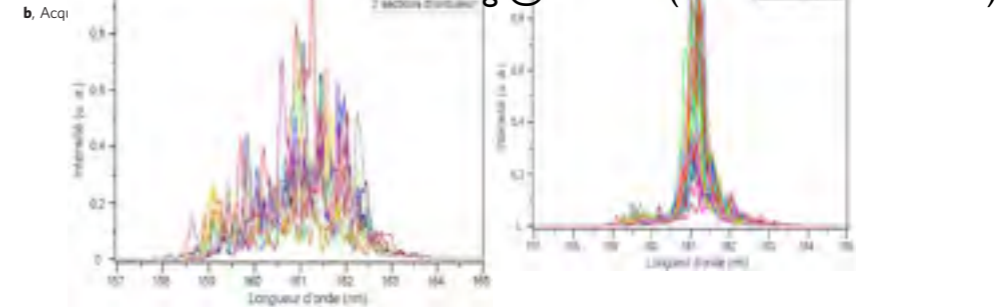
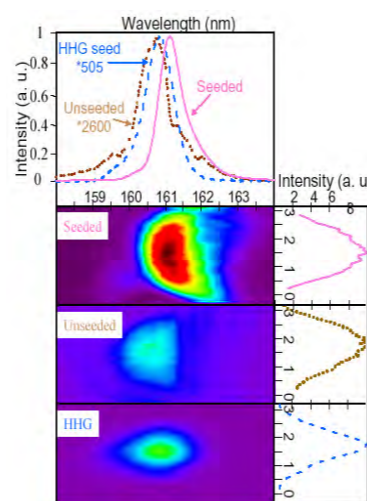


Figure 1: Seeding @ 160 nm (SCSS Test Accelerator)

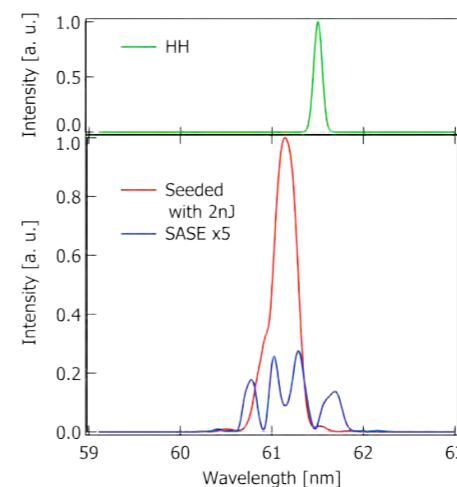


• Gamme spectrale

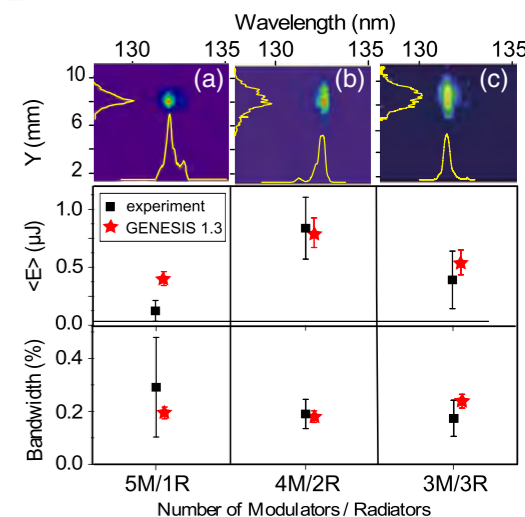
- seeding HHG (160 - 60 nm @SCSS Test Acc., 160 nm @SPARC, 30 nm @sFLASH)
- up-frequency multiplication (260 nm -> 4 nm at FERMI)



G. Lambert et al., Nature Physics Highlight, (2008) 296-300



T. Togashi et al., Optics Express, 1, 2011, 317-324



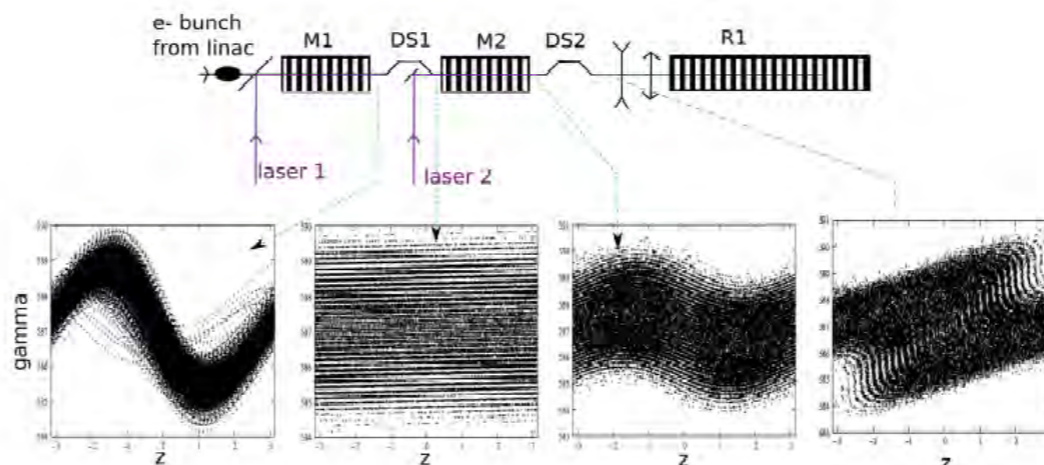
M. Labat, et al., Phys. Rev. Lett. 107, 224801 (2011)

Les configurations laser à électrons libres

Écho : Echo Enable Harmonic Generation : deux interactions électron-laser



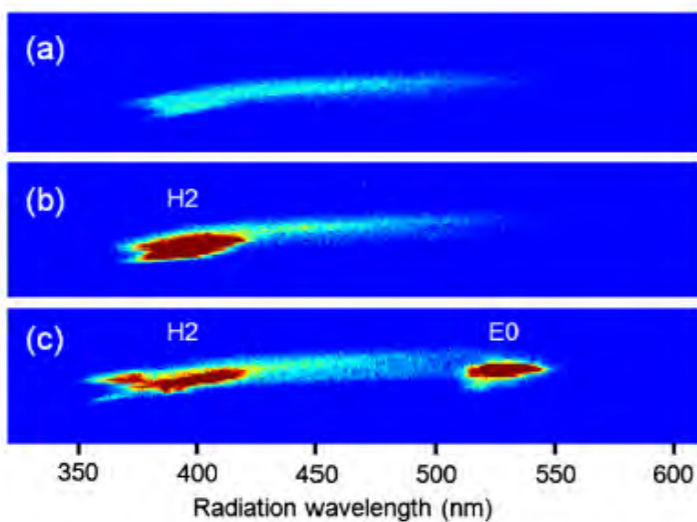
$$\frac{1}{\lambda_{echo}} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$



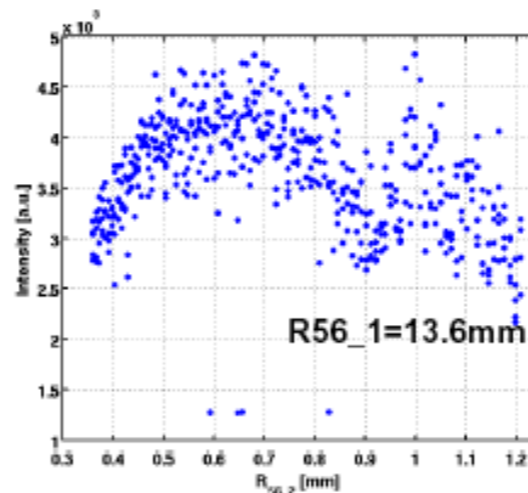
G. Stupakov, PRL 102, 074801 (2009)

D. Xiang et al., PRL 105, 114801 (2010)

ordre élevé
harmonique atteint
de façon compacte



D. Xiang et al., PRL 105, 114801 (2010)



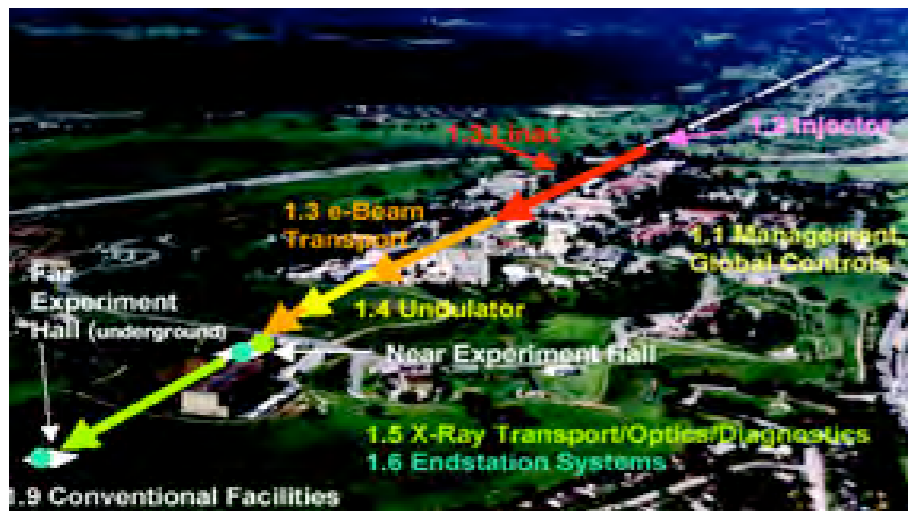
Zhao et al., Nature Photonics

Echo 15 démontré à SLAC
sur NLCTA

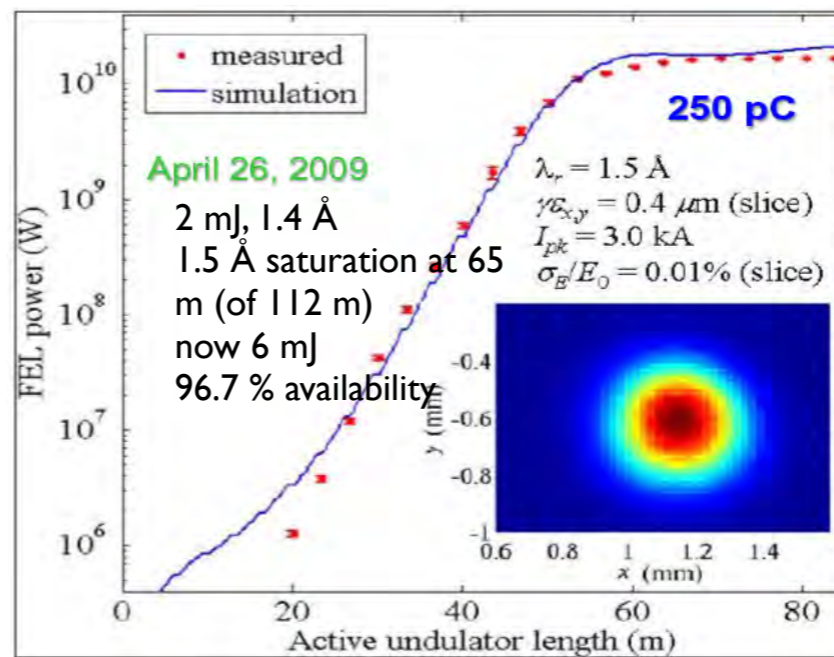
D. Xiang, FEL 2013

LCLS et SACLA dans le domaine de l'Ångström

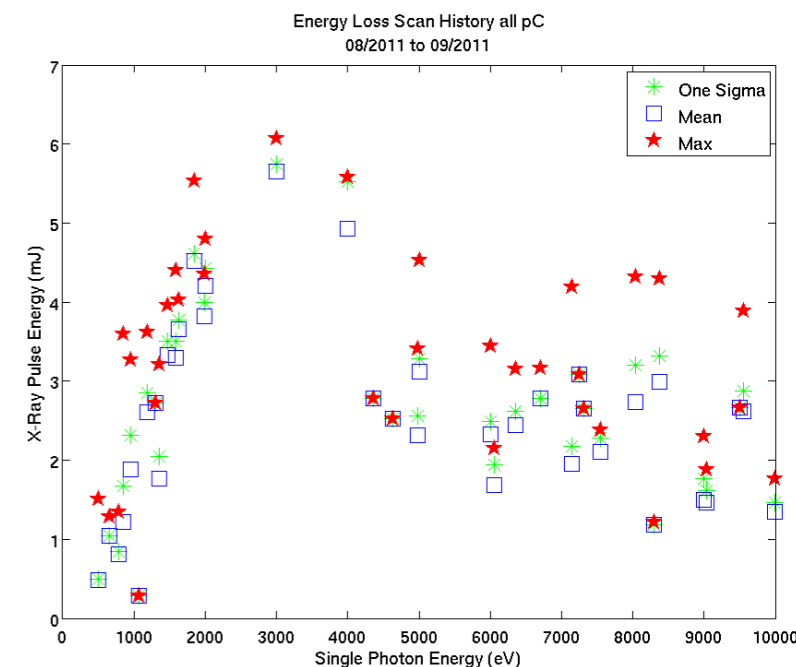
4 fs-50 fs, mJ, GW, brillance crête : flux moyen 10^{16} ph/s, 10^{33} (10^{24}) ph/s/mm²/mrad², deux couleurs LCLS



<http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/>



P. Emma et al., Nature Photonics, 2010, 176)

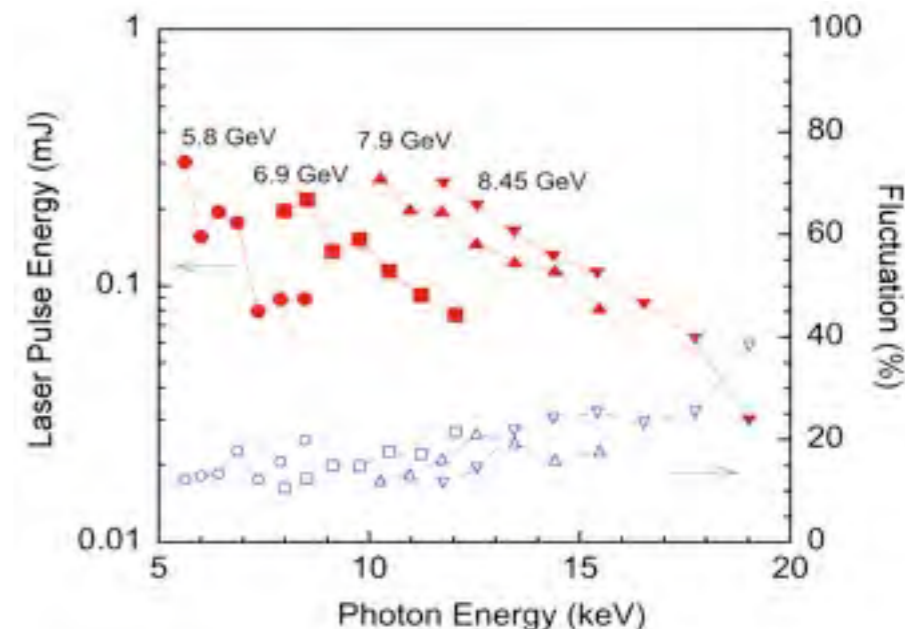
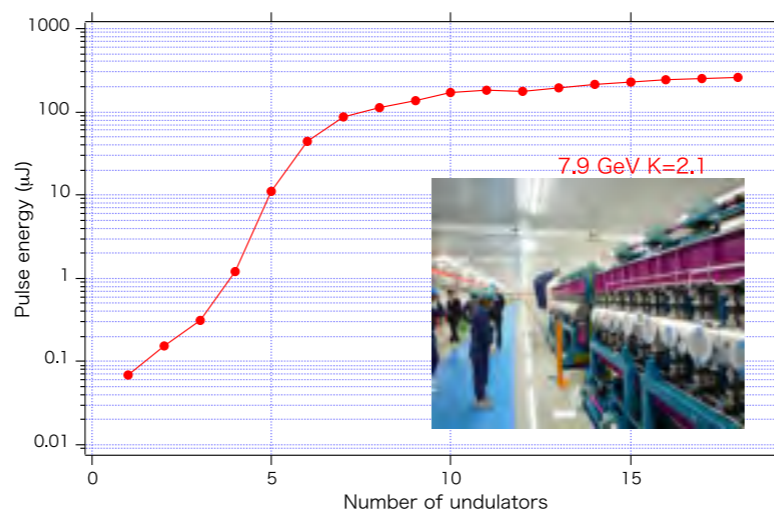


SACLA



<http://www-xfel.spring8.or.jp/index.htm>

Gain curve of 10 keV

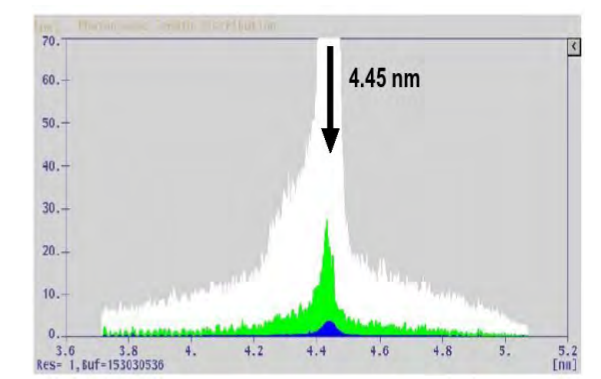
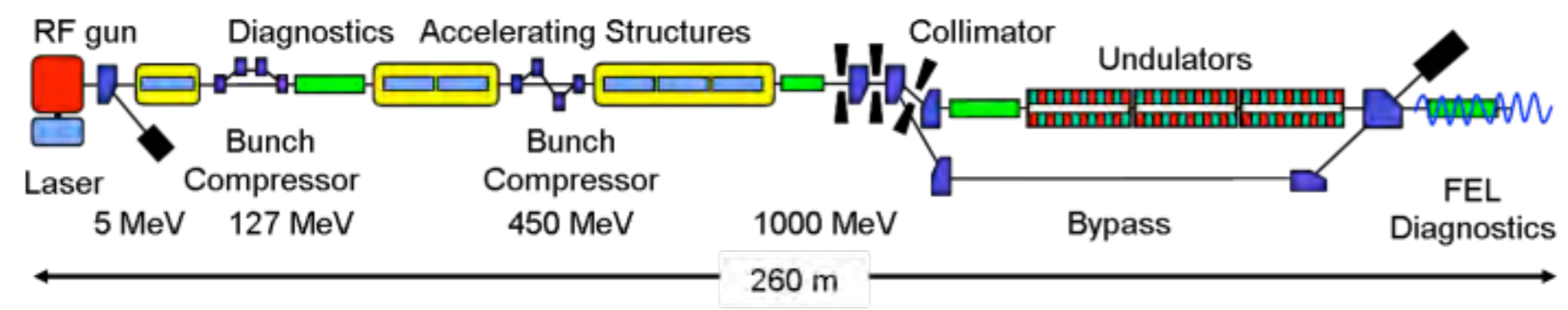


32 années après le premier LEL, 50 années après la découverte du laser

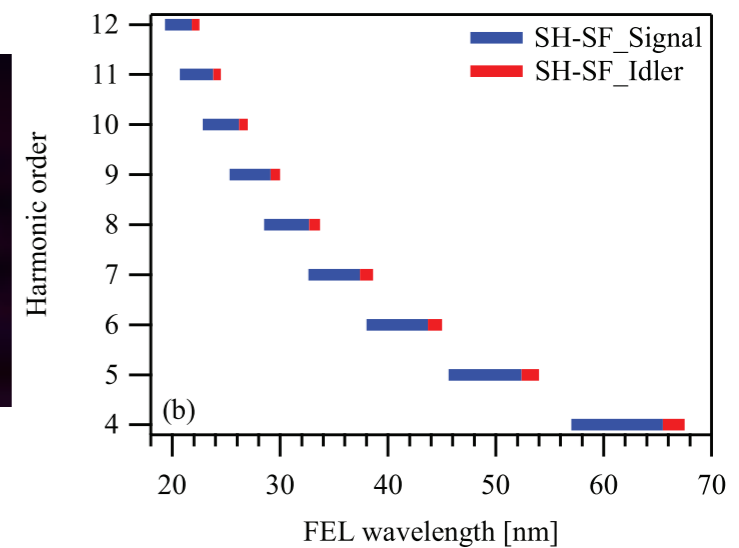
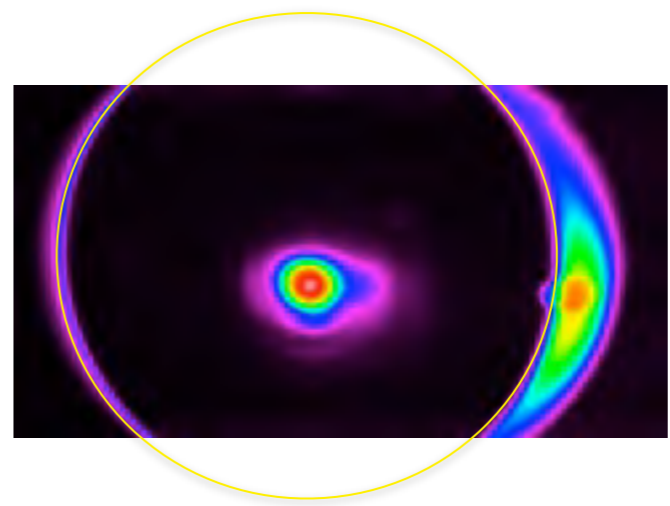
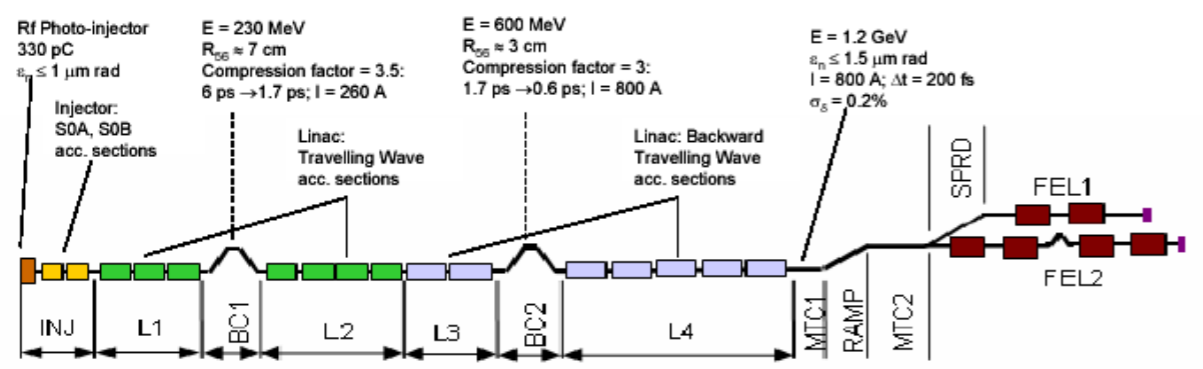
www.lunex5.com

FLASH, FERMI et SCSS Test Acc. dans le VUV, les X mous

FLASH : 30 nm (2005) 6 nm (2007), 4.5 nm (2010), FLASH-II under construction

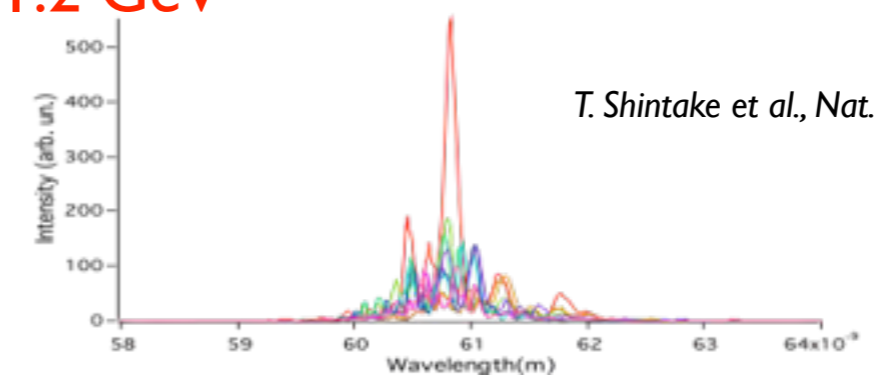
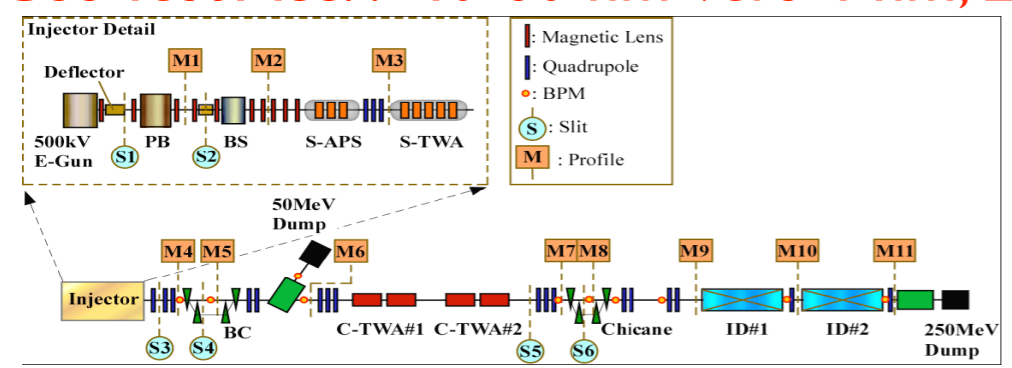


FERMI : 4-60 nm, sub-ps to 10 fs, 0.3 GW range, polarisation variable, 25-100 μj / impulsion



E. Allaria et al. New J. Phys. 145, 112009, 2012
Allaria E et al 2012 Nature Photon. 6 699-704

SCSS Test Acc. : 40-60 nm vers 4 nm, 250 MeV -> 1.2 GeV



T. Shintake et al., Nat. Phot. 2, 555-559 (2008)

Panorama des LEL de courte longueur d'onde

project

operating FEL

VUV- soft X ray

hard X ray



Qu'est-ce que la cinquième génération?

ultimate
storage rings,
ERL, FELs

impulsions as / résolution en énergie
élevée (BW : 10^{-6}) => faible dispersion
en énergie et émittance

énergies de
photons plus
hautes (en LEL)

haute
stabilité

Approcher les limites de diffraction et de Fourier dans une large gamme
spectrale, avec de la flexibilité pour les utilisateurs

manipulation des propriétés du
LEL => seeding, echo, single
spike, modified SASE, XFELO

utilisateurs
unique /
multiples

haute cadence :
anneaux, linacs
supraconducteur

combinaison avec
lasers et THz (e.g.
pump-probe...)

Réaliser des systèmes plus «compacts»

nouveaux schémas d'
accélération compacts : Laser
wakefield acceleration, dielectric
acceleration, inverse FEL

Onduleur compact /
onduleur plasma/ laser
(Compton / Thomson
backscattering)

schémas de
multiplication
de fréquence

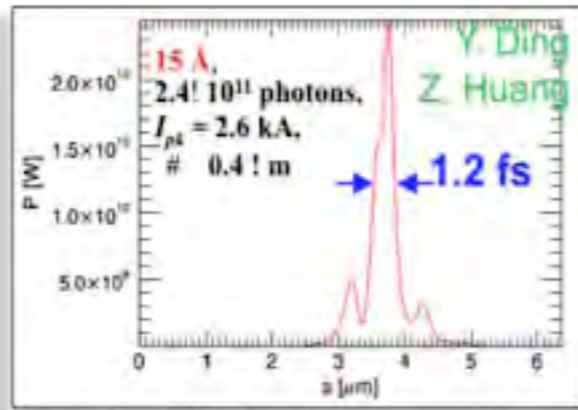
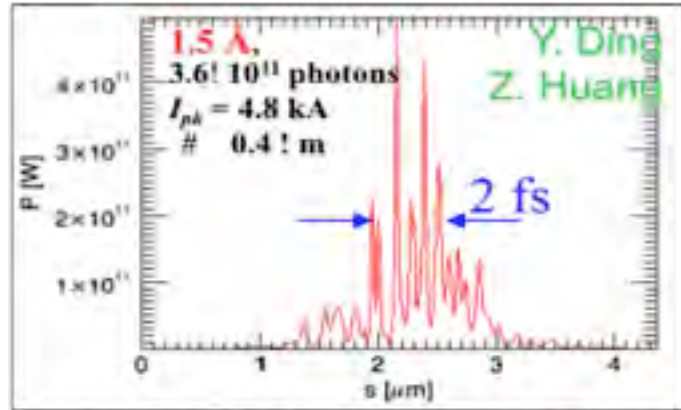
impulsions
courtes

Physics and applications of High Brightness Beams : towards a fifth generation light source, Puerto-Rico, March 25-28, 2013

Fonctionnement dans les X en single spike

- Régime de faible charge paquet d'électrons courts

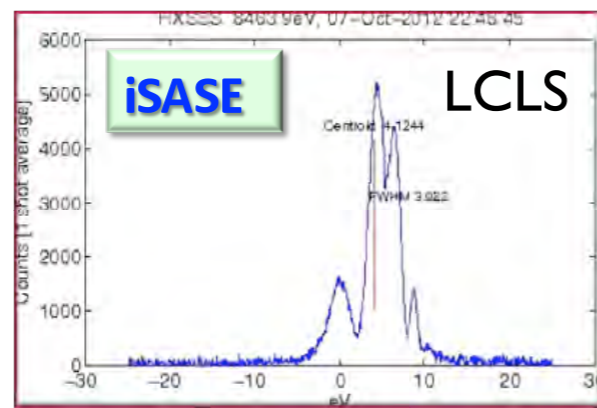
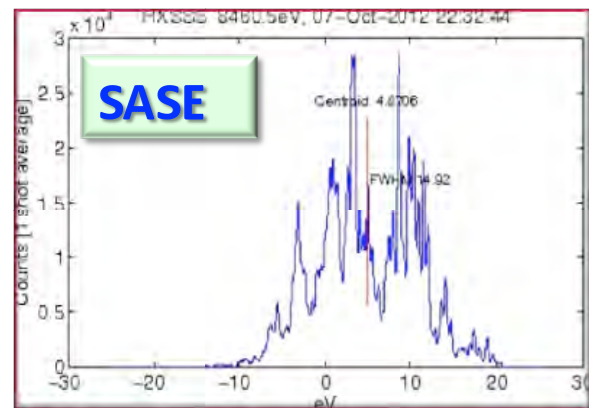
SIMULATED FEL PULSES



LCLS

- iSASE (improved SASE)

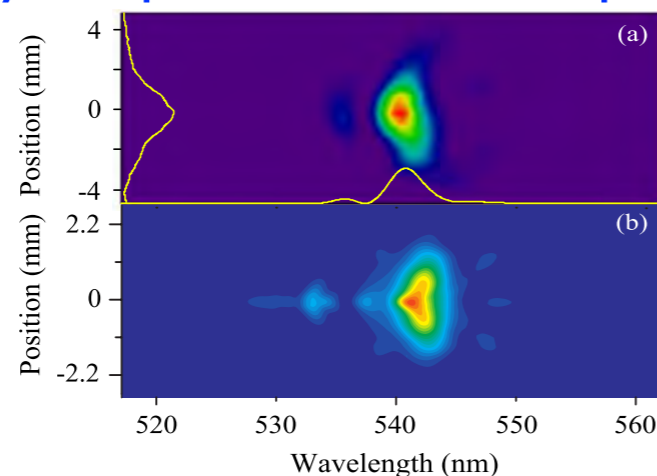
allongement du slippage par chicane



- Electron beam energy chirp and undulator taper

SPARC

L. Giannessi et al., Phys. Rev. Lett. 106, 144801 (2011)



- Self-seeding

Feldhaus et al., Opt. Comm 140 (1997) 341

Geloni, Journal. Modern Optics, 58, 16, 2011

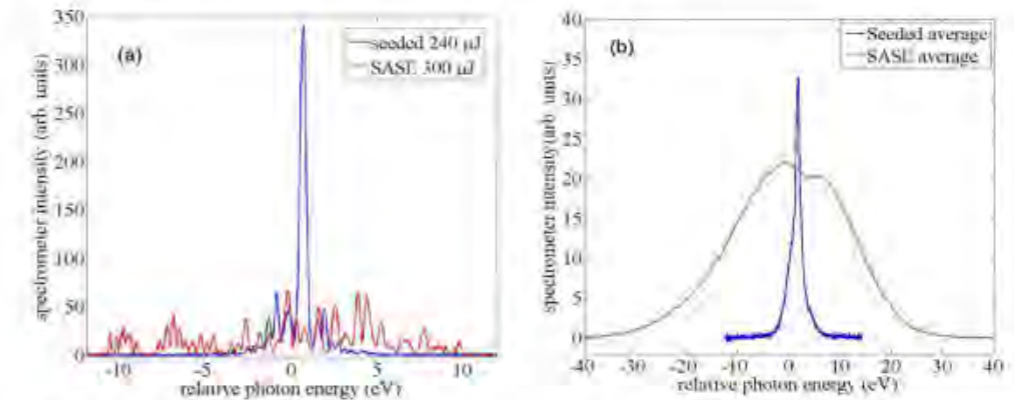
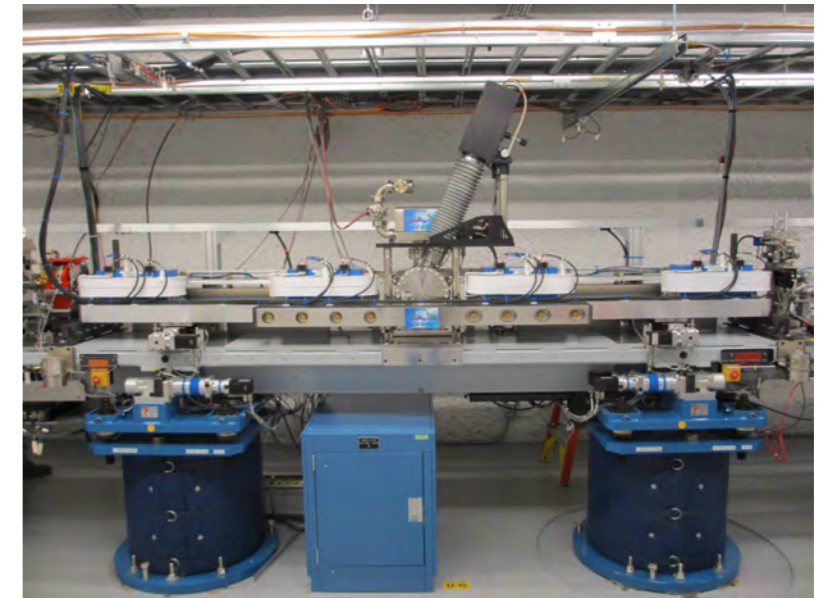


Figure 5. Single-shot (a) and averaged (b) x-ray spectrum in SASE mode (red) and self-seeded mode (blue). The FWHM single-shot seeded bandwidth is 0.4 eV, whereas the SASE FWHM bandwidth is approximately 20 eV. Vertical scales have the same arbitrary units in both plots (a) and (b). The chicane is turned off for the SASE measurements, but necessarily switched on for the self-seeded mode.

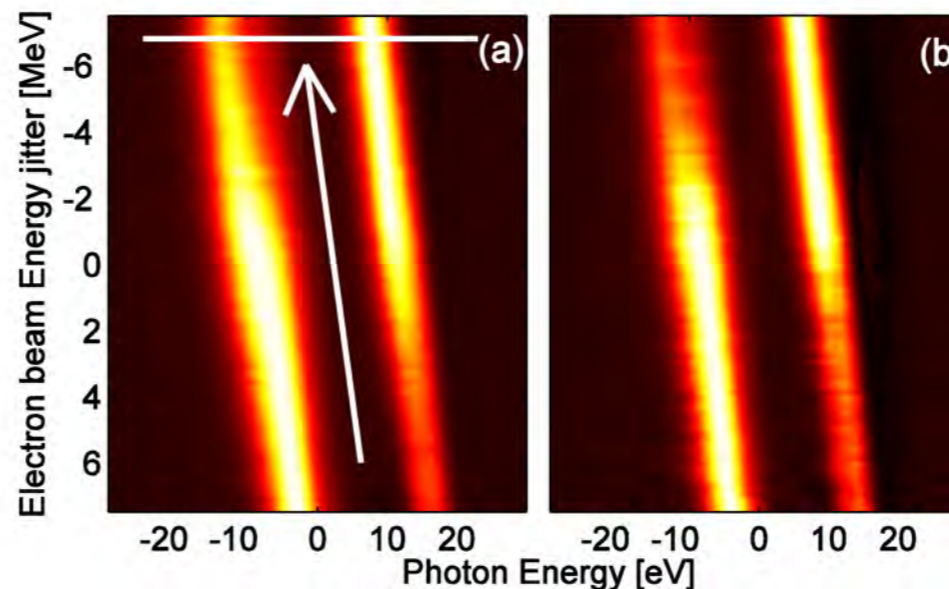
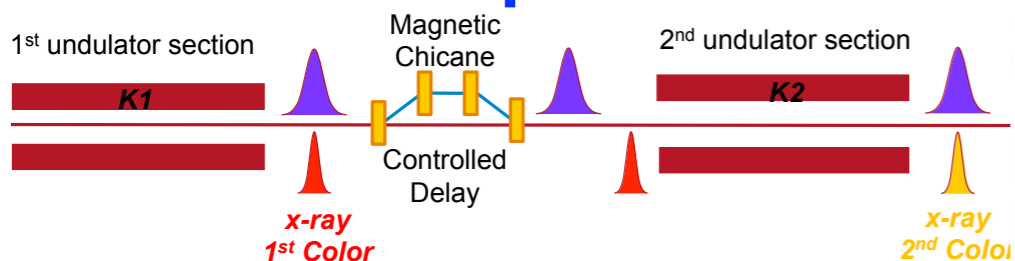
Demonstration of self-seeding in a hard-X-ray free-electron laser, J. Amann, W. Berg, V. Blank, F.-J. Decker, Y. Ding, P. Emma, Y. Feng, J. Frisch, D. Fritz, J. Hastings, Z. Huang, J. Krzywinski, R. Lindberg, H. Loos, A. Lutman, H.-D. Nuhn, D. Ratner, J. Rzepiela, D. Shu, Yu. Shvyd'ko, S. Spampinati, S. Stoupin, S. Terentyev, E. Trakhtenberg, D. Walz et al., Nature Photonics 6, 693–698 (2012)

www.lunex5.com

LEL à deux couleurs

Two colour operation of a Free Electron Laser and applications in the mid-infrared, R.Prazeres, F.Glotin, C.Insa, D.A.Jaroszynski, J.M.Ortega, Nuclear Instr. and Methods, A407, 464 (1998),
 Two colour operation of a Free Electron Laser and applications in the mid-infrared, R.Prazeres, F. Glotin, C.Insa, D.A.Jaroszynski, J.M.Ortega, Eur. Phys. J. D3, 87 (1998)

LCLS avec délai par chicane

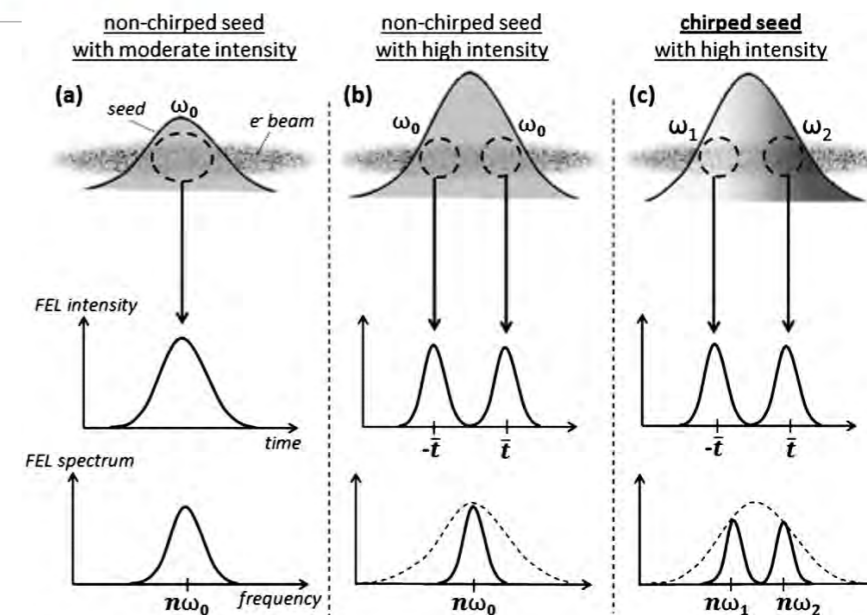
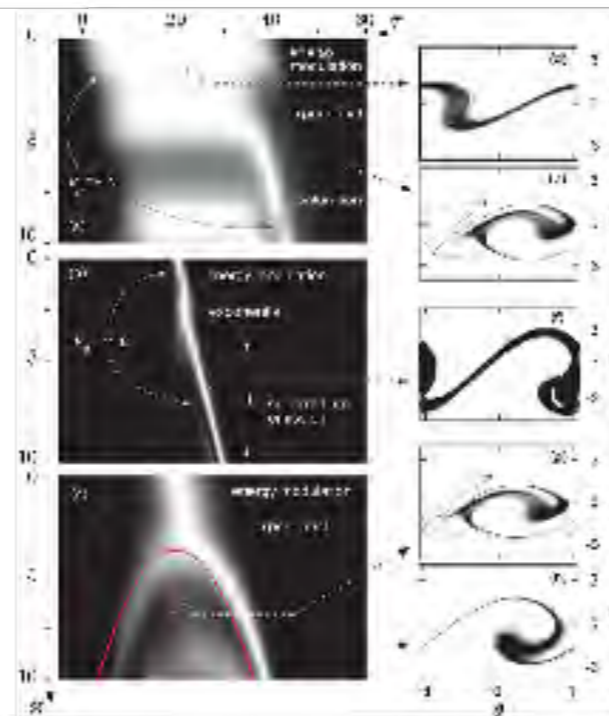
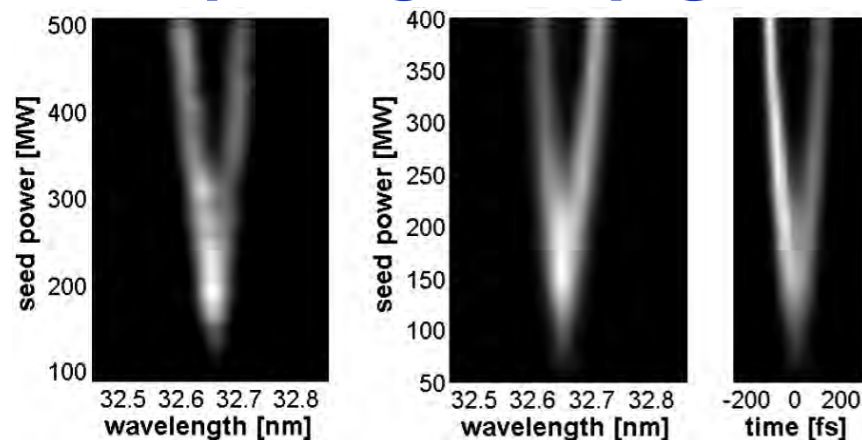


$E_b = 5800 \text{ MeV}$
 and $E_\gamma = 1.5 \text{ keV}$

A.A. Lutman et al., Experimental demonstration of fs two-color X-ray FELs, PRL 110, 134801 (2013)

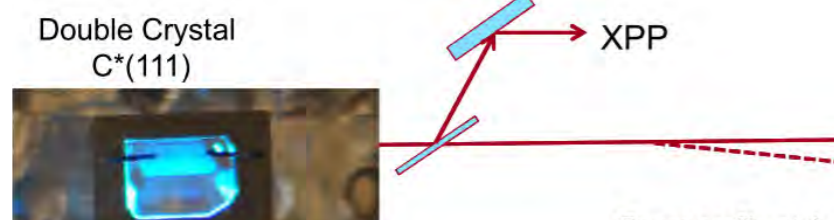
- double slotted emittance spoiler enabling to control the delay (fresh bunch)
- iSASE with delay (phase shifter), undulators slightly detuned to act as phase shifters. U1 (K1), U2 (K2), U1(K1), U2(K2)

Pulse splitting + chirp @ FERMI



G. De Ninno et al. PRL, 110, 064801 (2013)

X-ray direct splitting @LCLS



First C*(111) crystal is 100µm thick
 • Highly transmissive for X-rays outside Bragg reflection bandwidth)

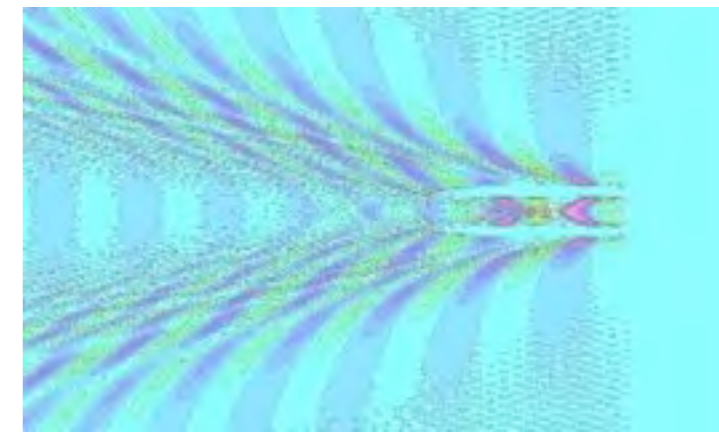
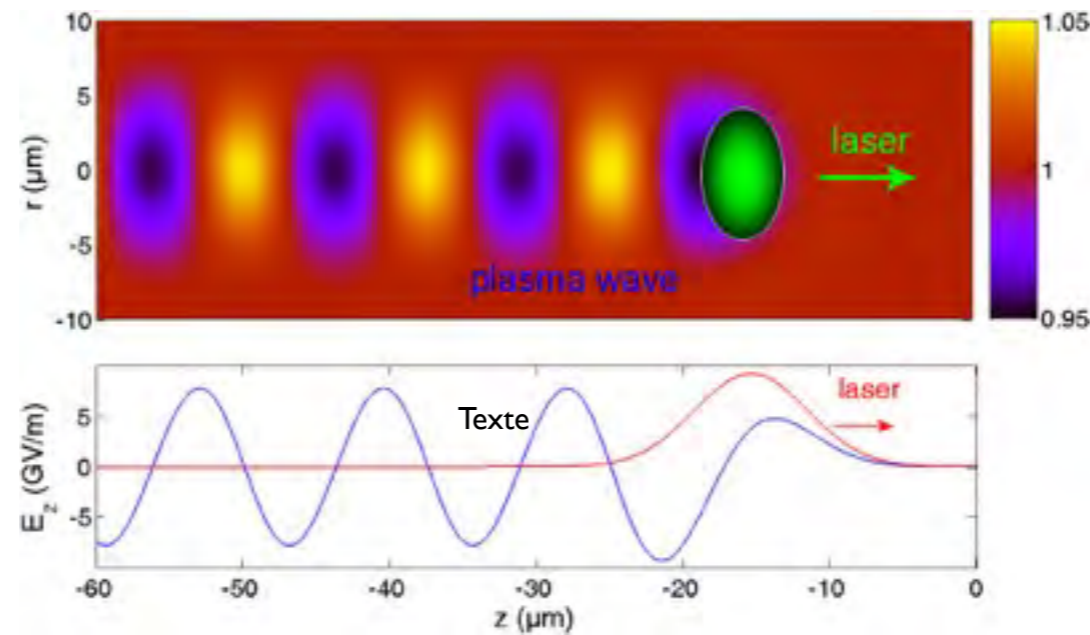
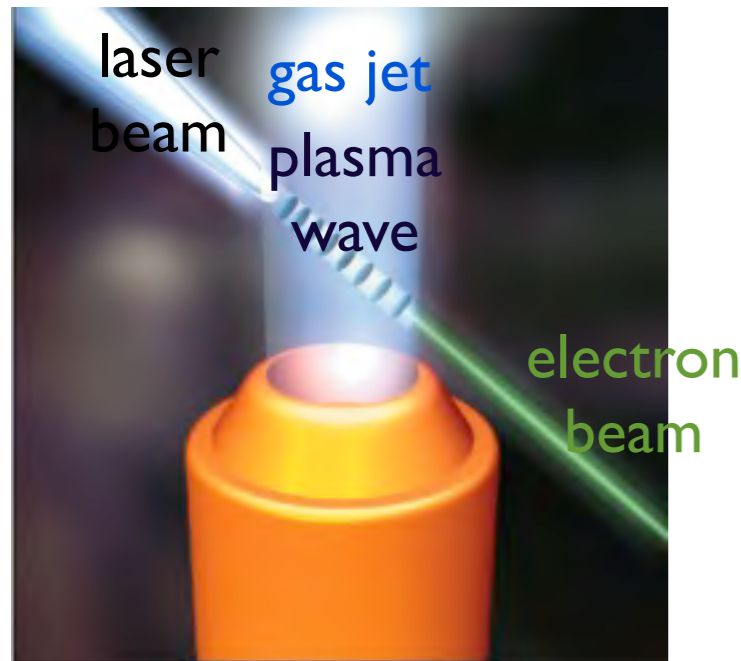
71% beam transmission at 8.33 keV

Pulse splitting in short wavelength free electron laser, M. Labat, N. Joly, S. Bielawski, C. Swaj, C. Bruni, M. E. Couprie, Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 264801

Accélérateur compact : Laser WakeField Accelerators

Laser intense focalisé dans un gaz (jet, cellule, capillaire)

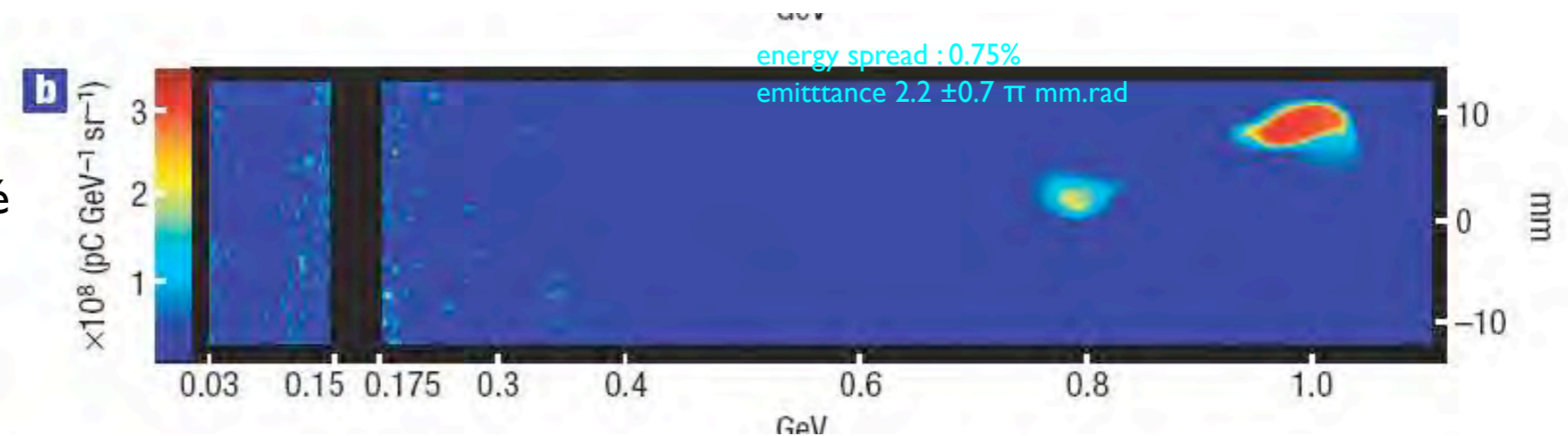
Le sillage du laser en résonance avec le plasma : $\tau_{\text{laser}} \sim T_p/2$
 \Rightarrow perturbation de la densité électronique et champ longitudinal accélérateur



Wake Patterns Boat Design Forums - AxSoris

Différents schémas :

- auto-injection transverse
- auto-injection longitudinale
- injection dans un gradient de densité
- à deux lasers collision chaude
- à deux lasers collision froide
- collision transverse

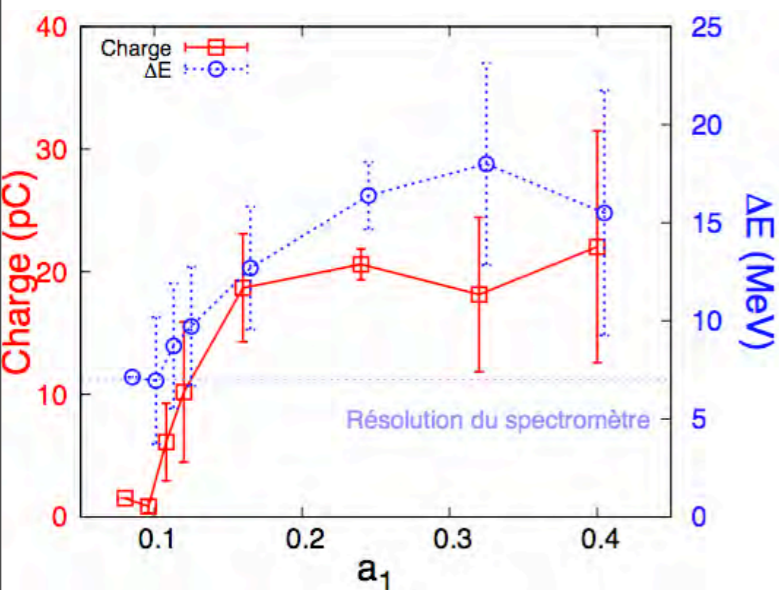
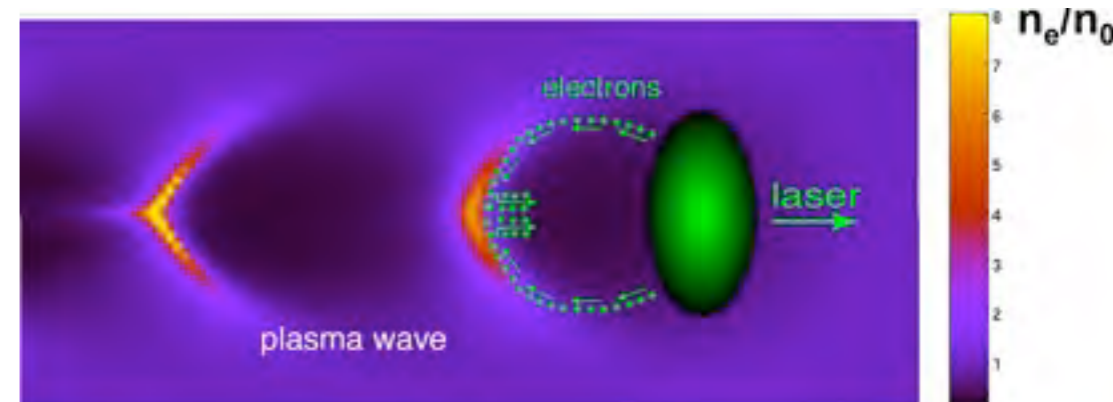


W. P. Leemans et al., Nature Physics 418, 2006, 696

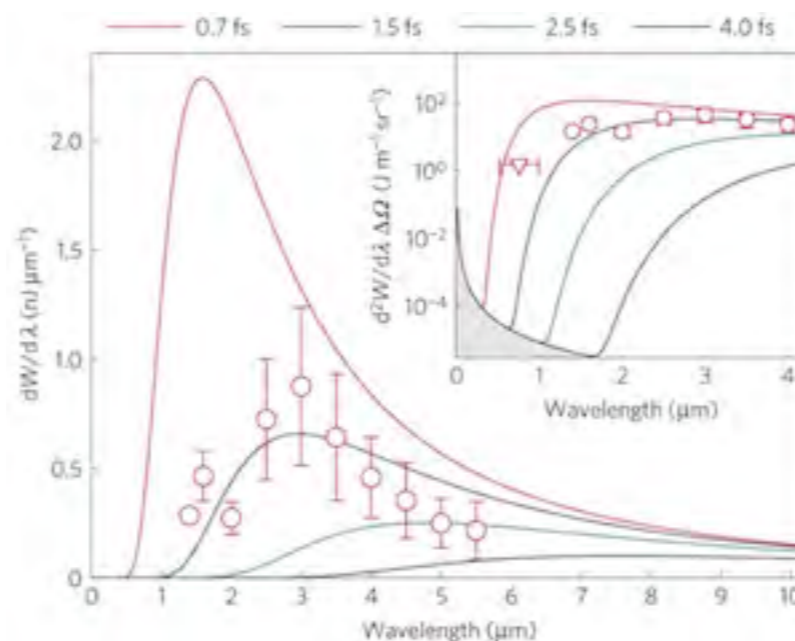
Laser Wakefield Accelerator

Faisceau LWFA

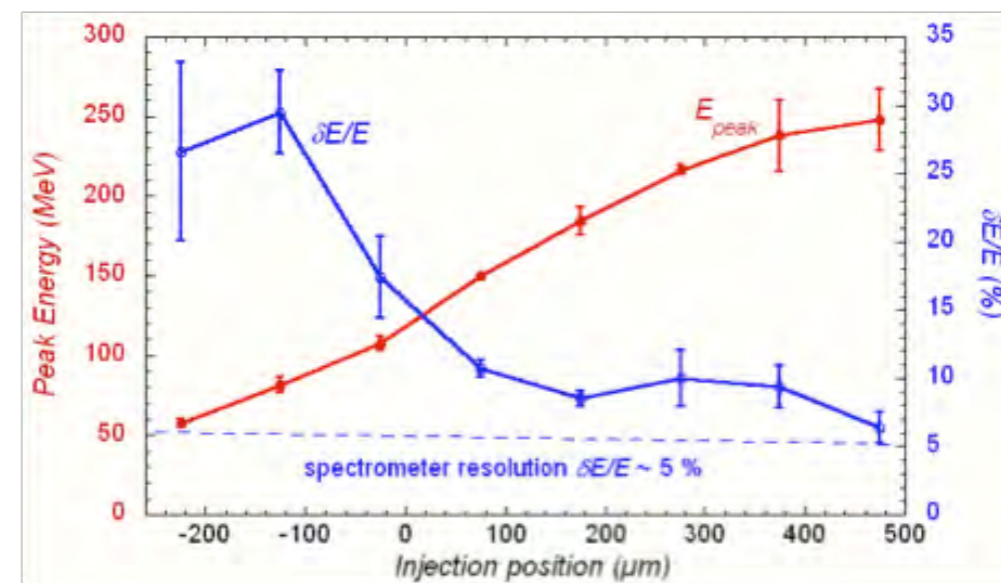
- très court (fs)
- divergent (1 mrad)
- de petite taille (1 μm)
- dispersion en énergie large (1 %)



C. Rechatin et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 194804 (2009)



1.5 fs RMS duration : Peak current of 4 kA
O. Lundh et al. Nature Physics,



	2002	2004	2009
Energy spread (%)	100	5	1

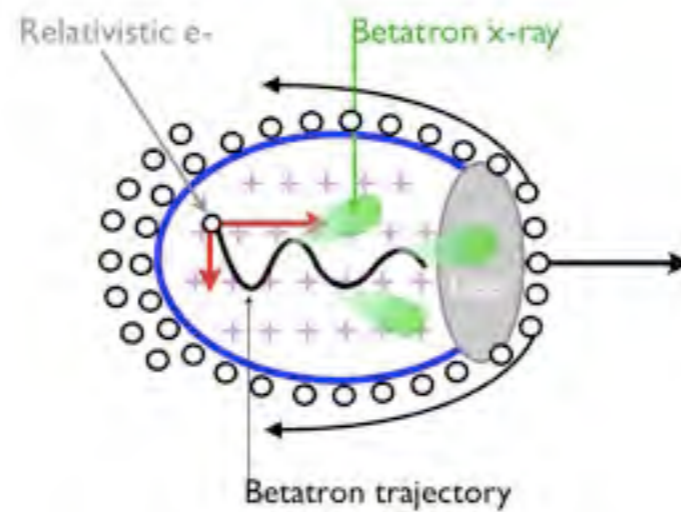
below : C. Cipiccia et al. Nature Physics, 2011

Accélération laser plasma et applications

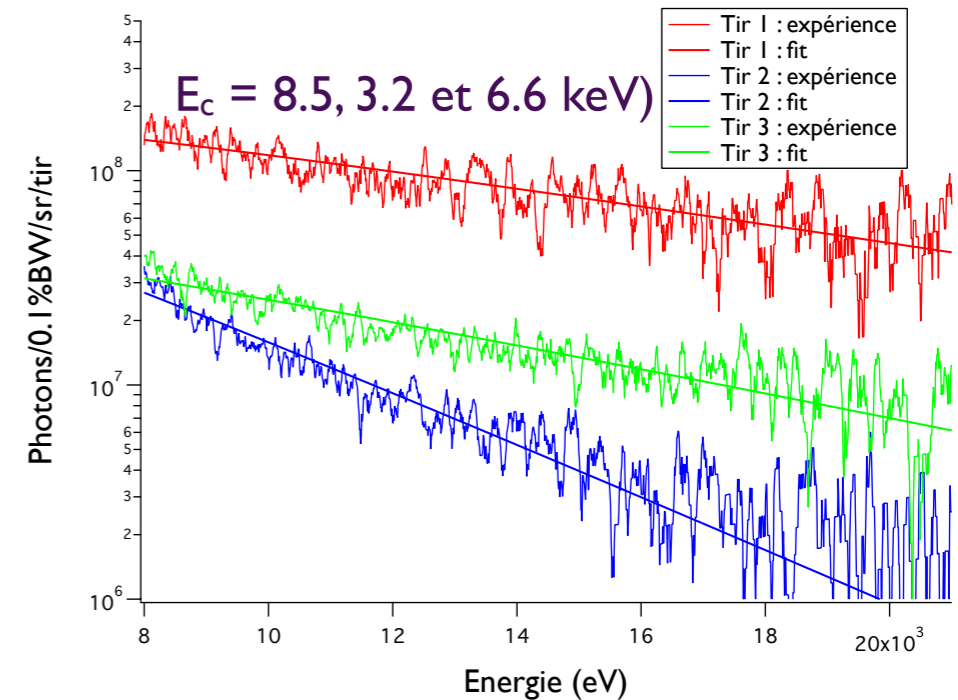
- Rayonnement Betatron

A. Rousse et al., *Phys. Rev. Lett.*, 93, 135005 (2004)

S. Formaux et al., *New J. Phys.* 13, 033017 (2011)



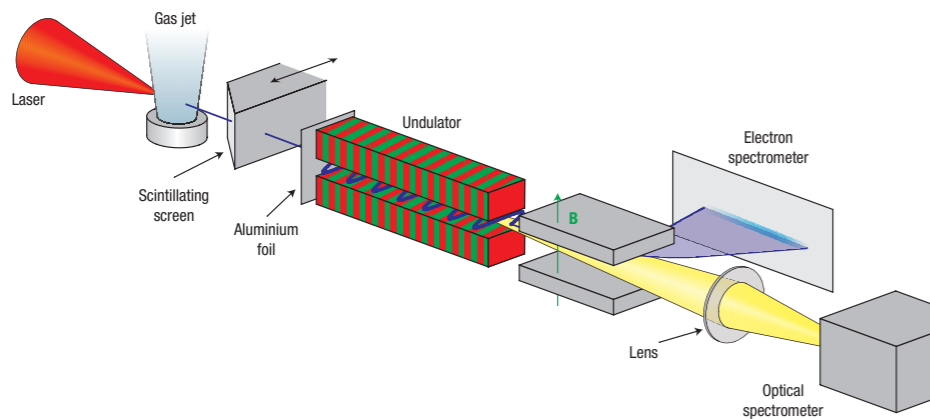
Courtesy V. Malka



- Diffusion Thomson

- Source d'électrons pour la diffraction

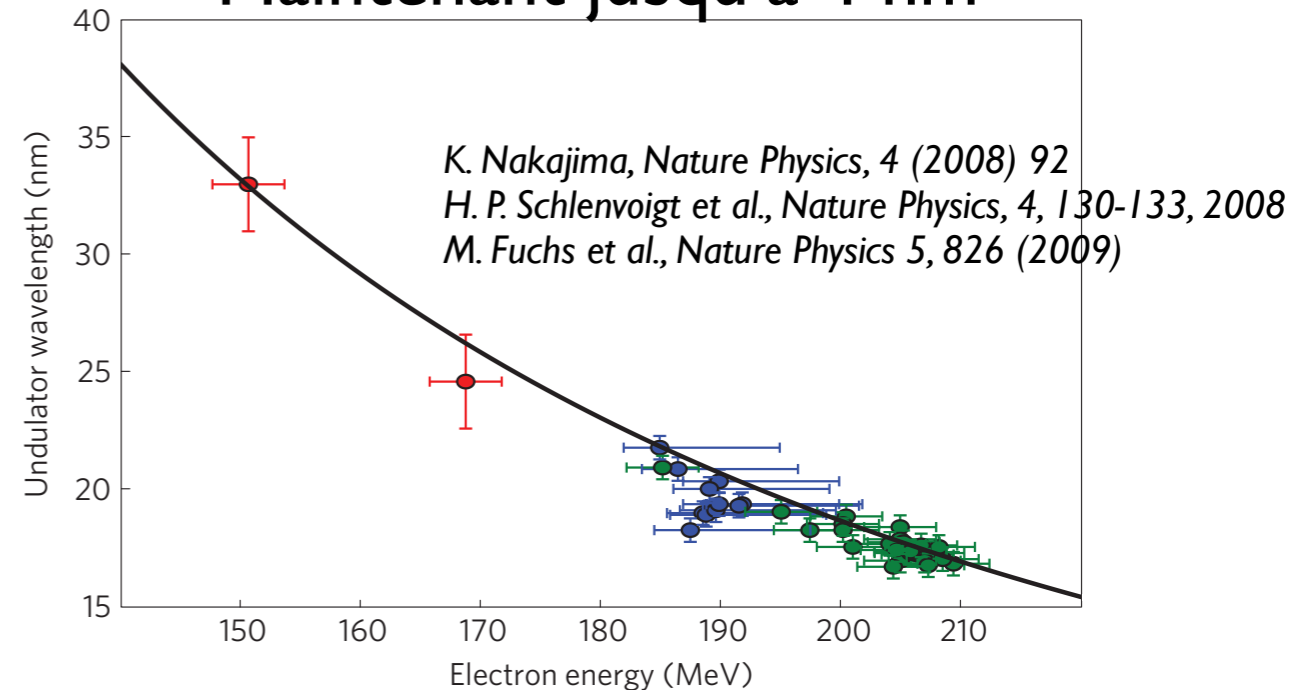
- Rayonnement onduleur spontané



- Rayonnement onduleur amplifié (FEL)?

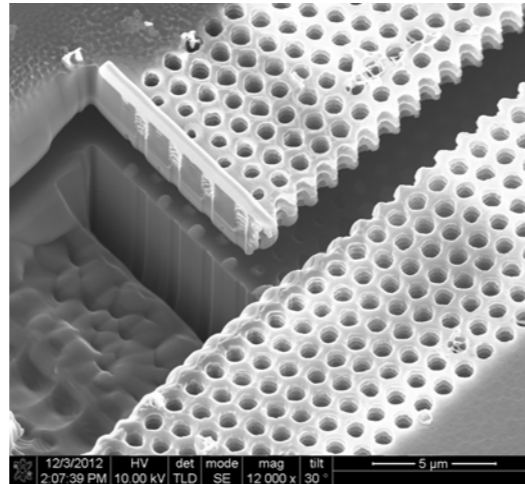
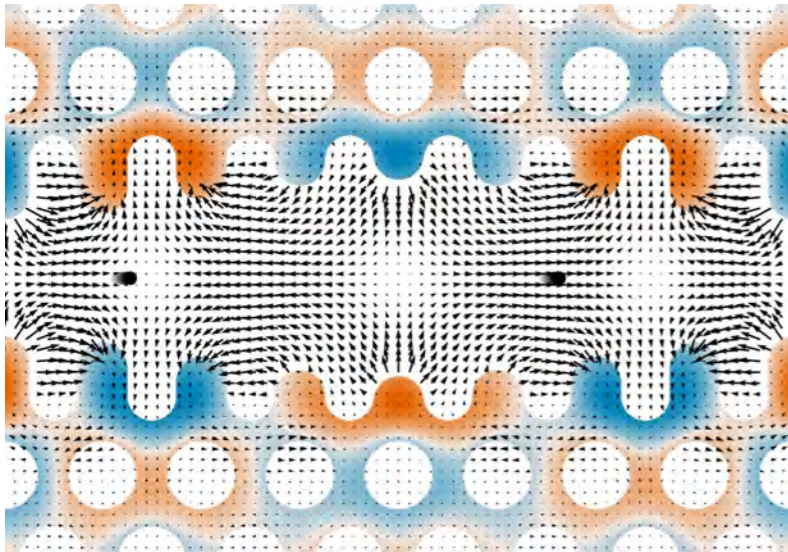
=> **Projet FEL : validation intermédiaire des LWFA avant application aux collisionneurs**

Maintenant jusqu'à 4 nm



Autres techniques d'accélération compacte

Dielectric accelerator

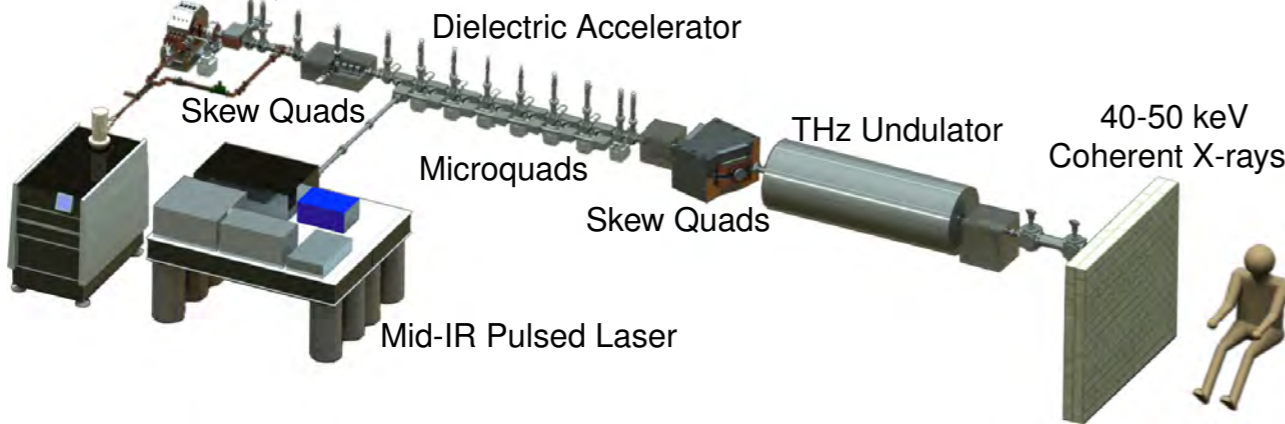


[Max Ho, UCLA Nanolab]

B. Naranjo, A. Valloni, S. Putterman, J. B. Rosenzweig, *stable charge-particle acceleration and focusing in an laser accelerator using spatial harmonics*, Phys. Rev. Lett. 109, 176803 (2012)
 J. Breuer, P. Hommelhoff, Phys. Rev. Lett. 111, 134803 (2013)
 E.A. Peralta et al. *Demonstration of electron acceleration in a laser driven dielectric microstructure*, Nature Lett. 12664, 2013

- Resonant spatial harmonic provides acceleration
- non resonant spatial harmonics provides focusing
- hole diameter typically 800 nm

S-Band Photoinjector

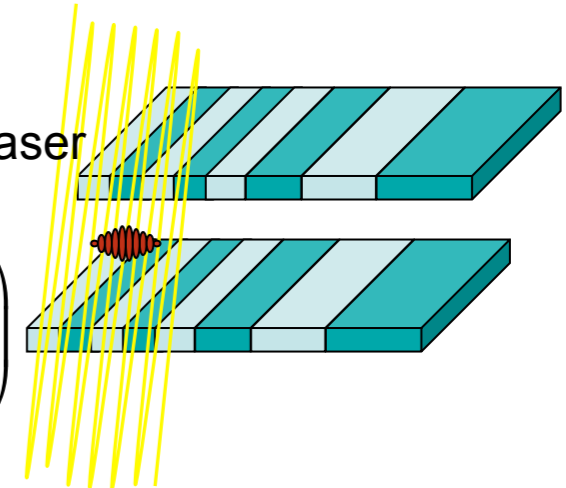


GALAXIES (UCLA)

Inverse FEL

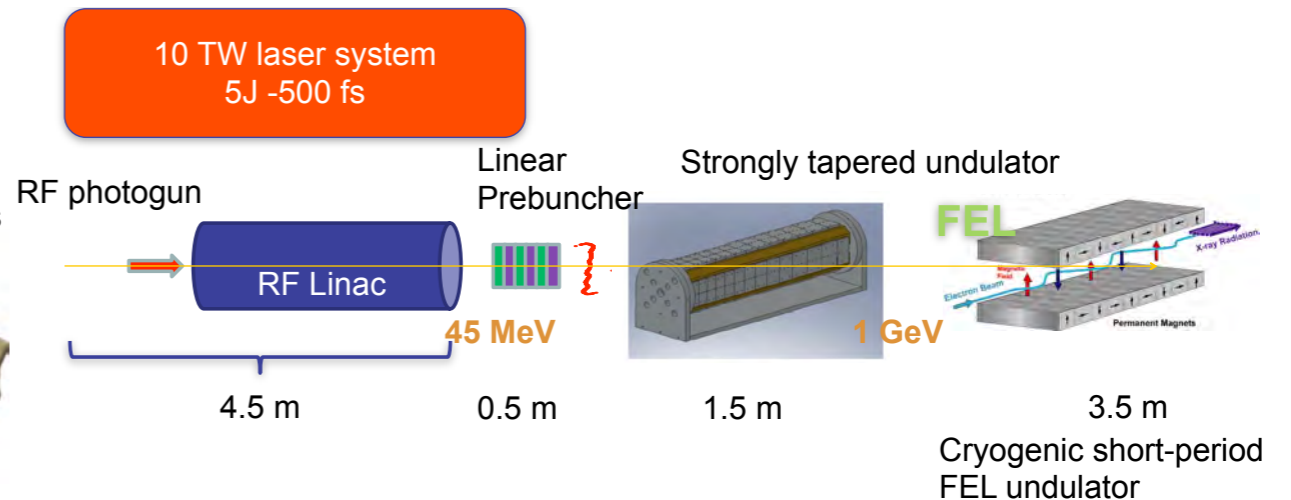
$$\gamma_r^2 \cong \frac{\lambda_w}{2 \times \lambda} \cdot \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

High power laser

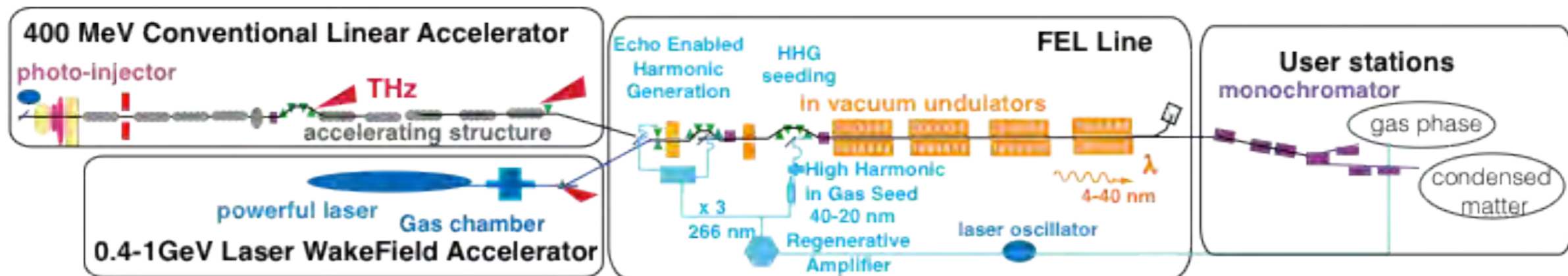


W. Kimura et al. PRL92, 154801 (2004)
 P. Musumeci et al. PRL94, 154801 (2005)
 P. Musumeci EAAC, Elba, May 2013

- STELLA 2 : gain of 17% of the energy
- IFEL @ UCLA : 15 => 35 MeV in 25 cm (0.5 TW @ 10.6 μm), 70 MeV / m
- RUBICON, LLNL : 105 MeV achieved recently



LUNEX5



40-4 nm, 20 fs and shorter

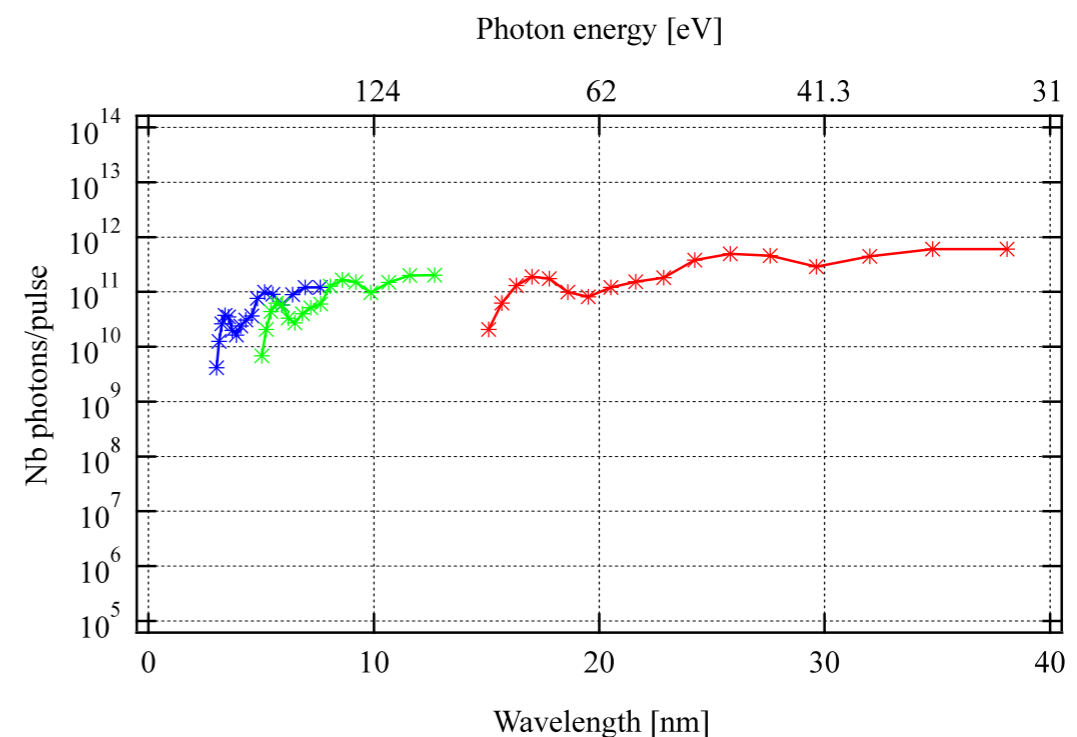
Un démonstrateur de FEL de cinquième génération :

linac supra : cohérence transverse et longitudinale, vers la haute cadence et les lignes FEL multiples

LWFA: FEL vu comme une application qualifiant le LWFA

expériences pilote et vision scientifique au-delà du démonstrateur

une étape avant une installation serveur multi-utilisateurs



La genèse du projet

Première idée.....

2011 :
«Dossier d'opportunité
SOLEIL»
Discussions avec des
membres du Conseil :
CNRS (B. Girard, C. Simon) ,
DSM (J. P. Duraud);

Présentation au Conseil
de SOLEIL
Juin 2011:
Demande d'APS
Demande de revue par un
comité (en lien avec le
SAC)
Présentation au Conseil
SOLEIL de Déc. 2011

PHASE d'Avant-Projet Sommaire

Définition technique de la configuration de référence avec les différentes options (accélérateur, implantation), les composants, les premières simulations, la description des expériences pilote et de la vision scientifique

Planning, coût et ressources,
Partenariat
CDR draft : fin Nov. 2011

Revue d'APS, 2 déc 2011

P. Georges (Institut d'Optique, France) : laser à fibres, laser, optique
R. Bartolini (Diamond / Oxford, UK) : FEL physique accélérateur
R. Assman (CERN, CH) : Responsable de EURONNAC, physique accélérateurs
J. E. Rubensson (Uppsala, Sweden). Physique atomique / moléculaire, SAC
J. Feldhaus (DESY, Germany). Optique, lignes de lumière, FLASH. E XFEL
Carl Schroeder (Berkeley): Accélération plasma

Conseil SOLEIL : Décembre-15, 2011

TREIZIEME RESOLUTION

Le Conseil prend connaissance du document d'avancement du projet LUNEX5 et approuve le démarrage d'une phase d'études complémentaires ciblées et de R&D associées, sur la base de financements spécifiques.

Il prend note du rôle de coordinateur rempli par le synchrotron SOLEIL dans le projet LUNEX5.

Conseil SOLEIL 2012 et 2013

Points d'avancement

Partenariat LUNEX5

Partenaires actuels :

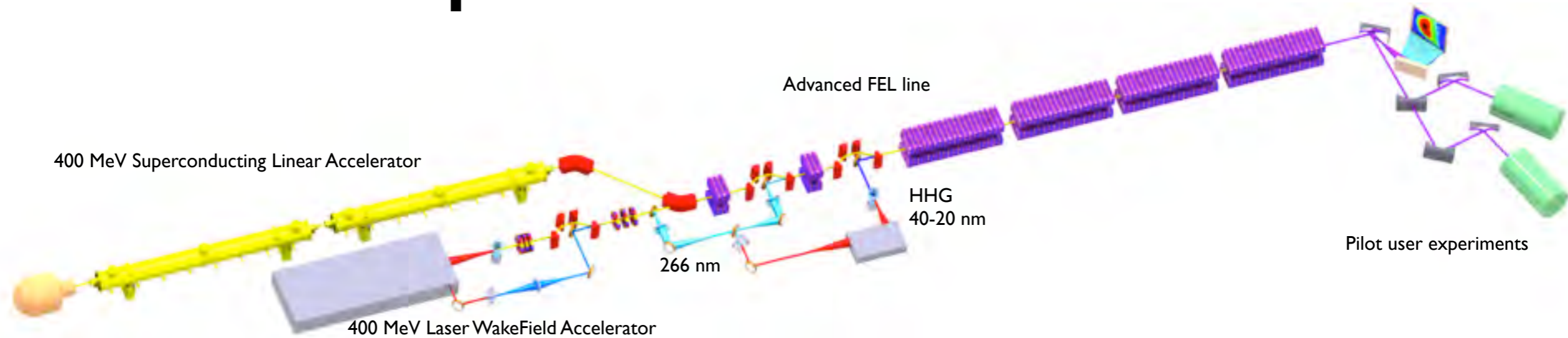
- SOLEIL
- CNRS :
 - le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL),
 - le Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) / ENSTA, École Polytechnique,
 - le Laboratoire de Physique des Lasers Atomes et Molécules (PhLAM) et Université de Lille, CERLA
 - le Laboratoire de Chimie Physique, Matière et Rayonnement (LPCMR).
- CEA :
 - , la Direction des Sciences de la Matière du CEA (CEA-DSM) :
 - le Service des Accélérateurs, de la Cryogénie et du Magnétisme (SACM) de l'Institut de Recherches sur les Lois Fondamentales de l'Univers (IRFU)
 - le Service des Atomes, Photons et Molécules (SPAM) de l'Institut de Rayonnement Matière de Saclay (IRAMIS).
- ESRF

Les utilisateurs au-delà des user pilote seront considérés comme **membres associés**.

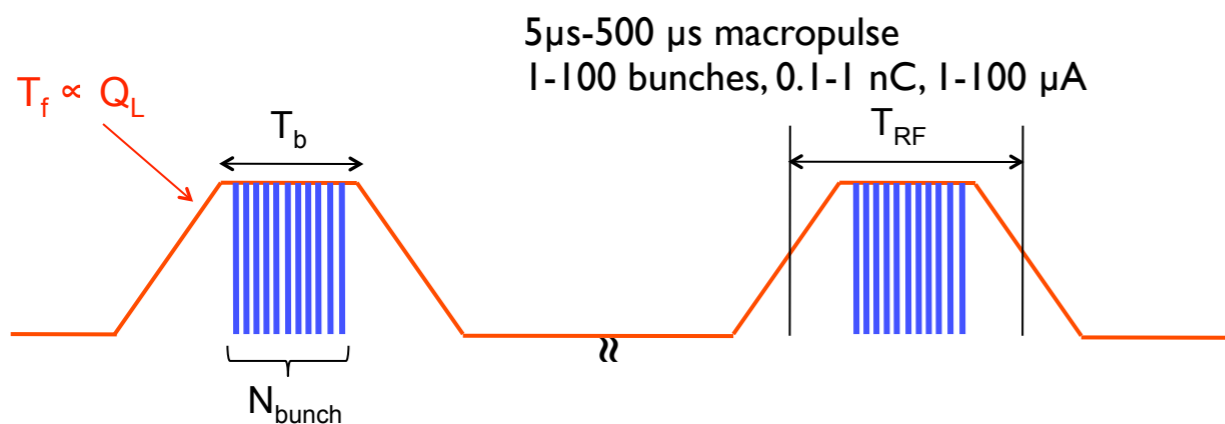
LUNEX5 est ouvert à de nouveaux **partenariats**, en fonction de la contribution scientifique ou financière.

Partenaires industriels : dans un second temps.

Complémentarité des accélérateurs



Le linac supraconducteur



- base solide et mûre pour l'études des lignes LEL avancées

- évolution vers la haute cadence

- évolution vers un centre serveur LEL multi-users (réduction des coûts de fonctionnement)

Le LWFA

- le LEL vu comme «une application» qualifiante
- compact / Lab. scale
- «high risk», «challenging»
retombées dans les études pour des multi-étages LWFA
- relativement basse cadence
- fiabilité de l'opération?

Expériences d'utilisateurs pilote

Systèmes isolés (atomes froid/molécules, clusters, nanopaticles)

Instrument : sepctromètre imageur à haute résolution

- **Dynamique de la fonction d'onde électronique et nucléaire dynamics** dans les molécules
- Dissociation moléculaire de dissociative **niveaux de cœur excités** (pump-probe)
- **Dynamique ultra rapide** dans des systèmes faiblement liés (clusters)
- **Effets Auger-Doppler** (tunneling electron)
- **Electron streaking** pour corrélér temps d'émission et délai

“pilot user experiments” et non “user’s facility”

vision au delà de LUNEX5 : le démonstrateur LUNEX de centres serveurs vers :

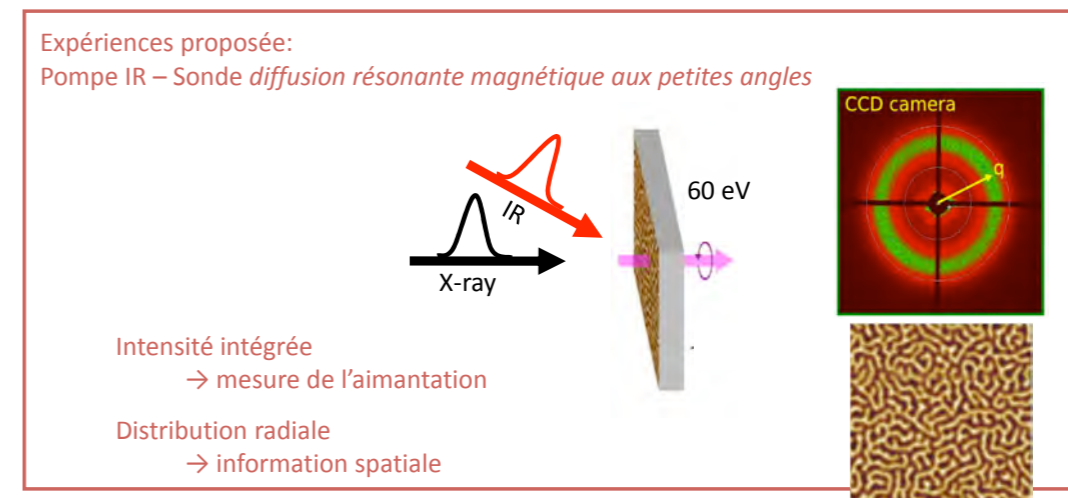
- la génération d'impulsion ultra-rapides u (attosecond?)
- accès aux niveaux seuils du C,N,O et L des métaux de transition (< 4 nm)
- “single shot”
- phase diluée – nanoparticules, magnétism, réactivité chimique, biologie (time resolved)

Matière condensée

Analyse résolue spatialement de la dynamique d'aimantation ultra-rapide suivante une excitation d'un film ferromagnétique l'impulsion laser fs infra-rouge

coherence => images X single shot du domaine magnétique
IR pump- X ray probe :

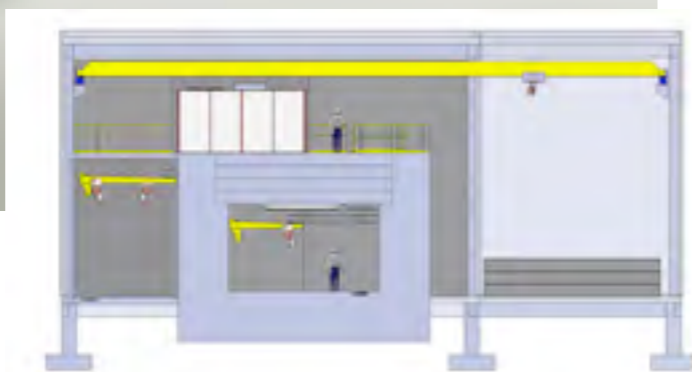
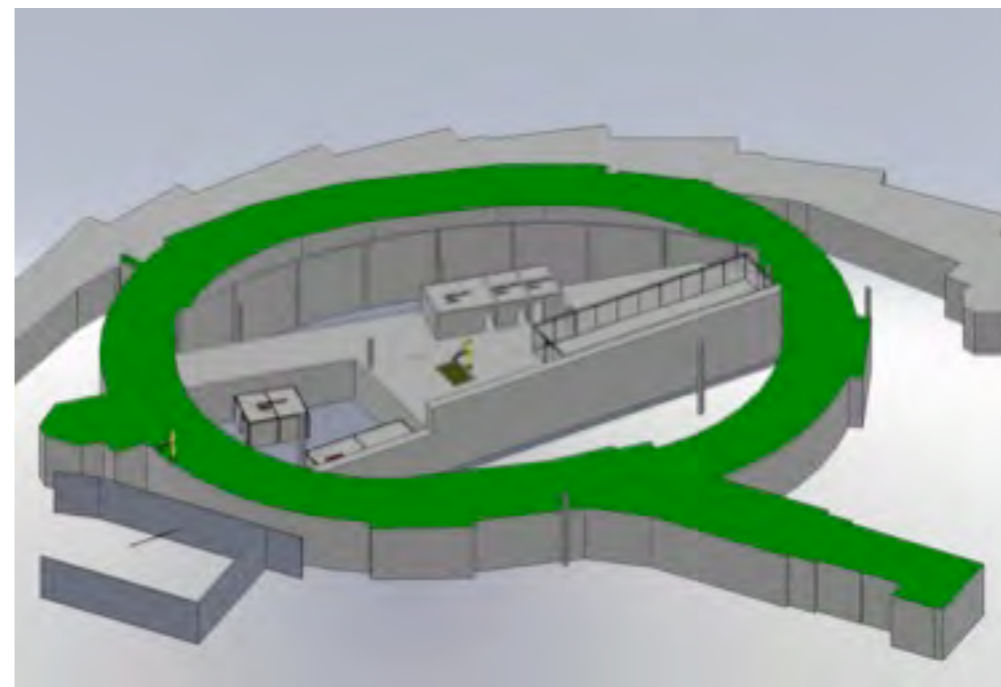
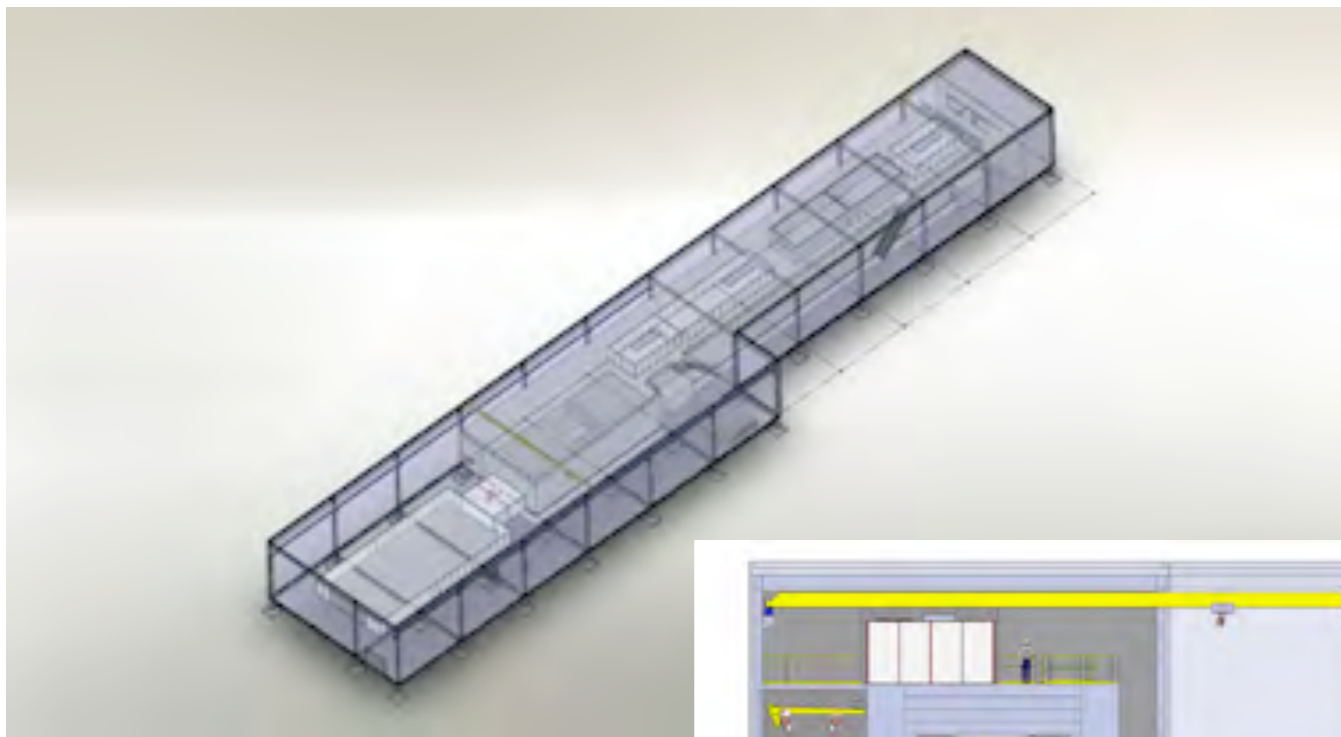
resonant magnetic small angle scattering - Seuil M des niveaux de transition



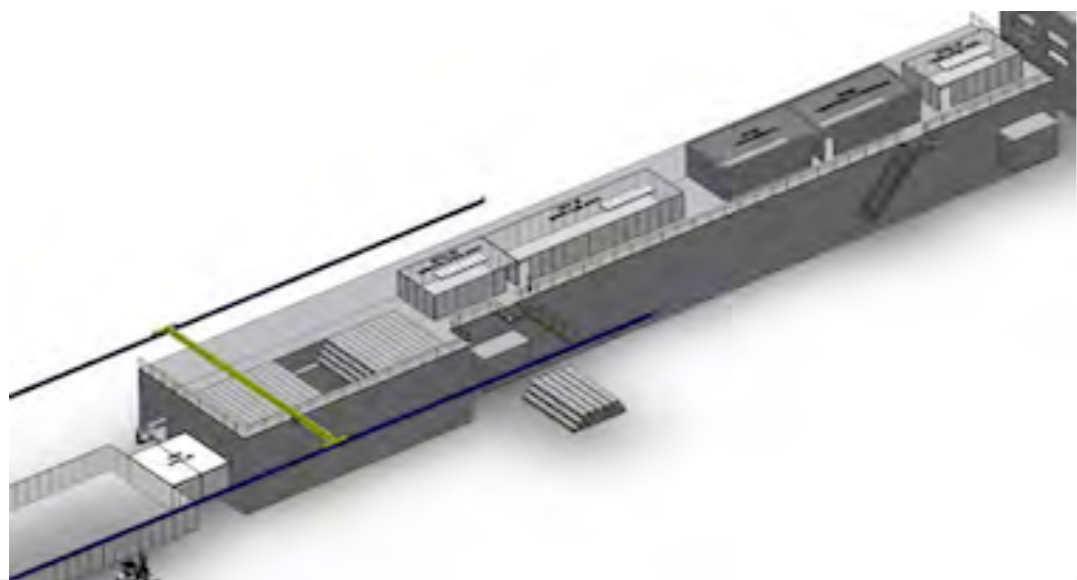
Implantation

Site vierge

arène booster SOLEIL



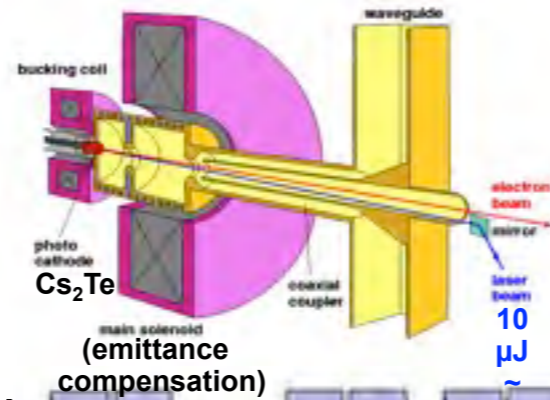
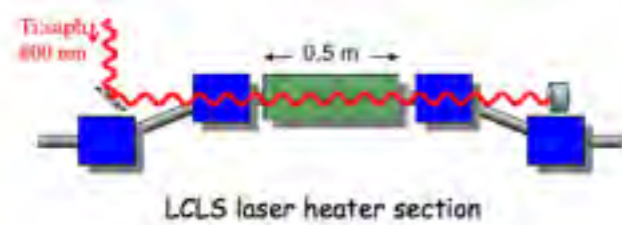
tunnel/ salles de l' ALS



Composants de LUNEX5

Compression Chicane :

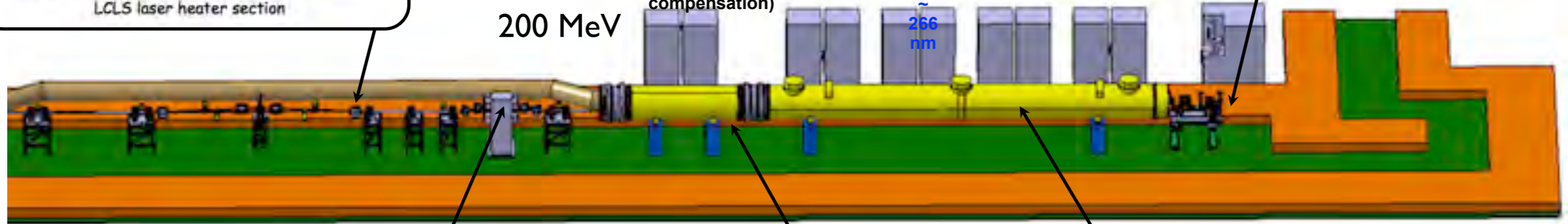
Reduction of the bunch length to 1 ps



High brilliance Photo-injector

typically 1 nC, 1 π mm.mrad, 4 ps rms, 100 A peak current
transverse and longitudinal laser flat-top distribution
RF gun type : FLASH, EXFEL type

200 MeV

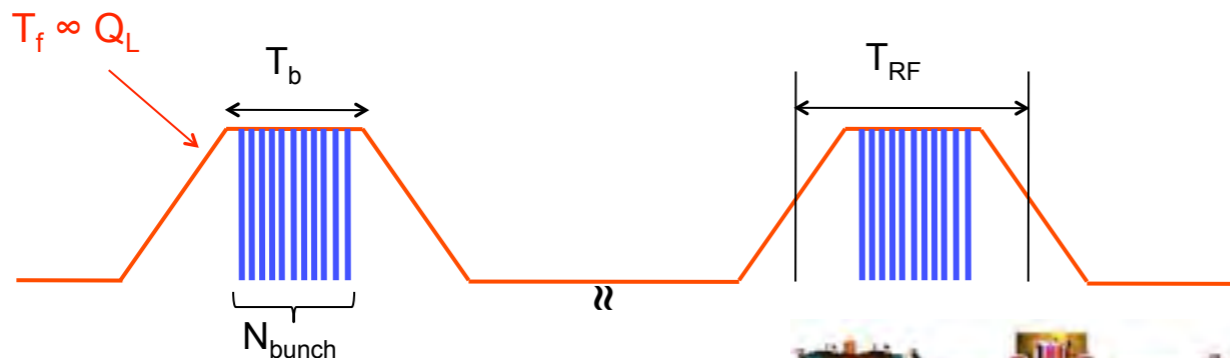


Laser heater :

enlarges the energy spread
laser modulation laser in a wiggler to avoid the micro-bunching in the compressor

Harmonic cavity (or chicanes) : Longitudinal phase space linearisation

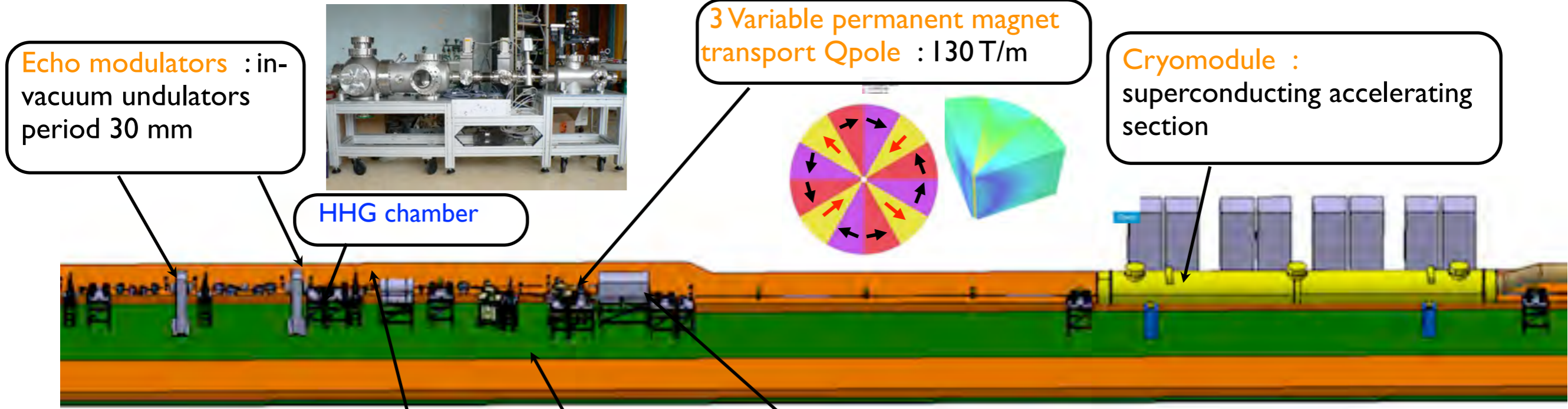
Cryomodule : superconducting accelerating section, 24 MV/m, 1.5 ms RF pulse, 50 Hz, 10 % duty cycle
Cryogenic power : 100 W at 2 K



5 μs-500 μs macropulse
1-100 bunches, 0.1-1 nC, 1-100 μA



Composants de LUNEX5



Echo chicane :

Chicane 1 (2)

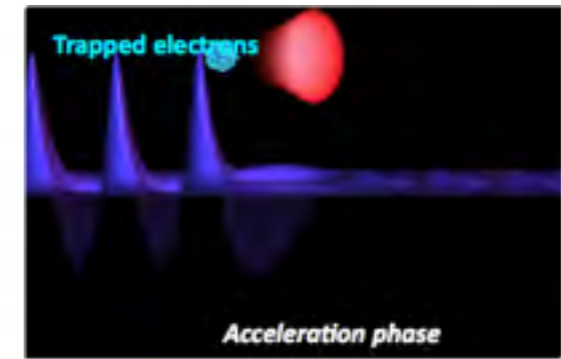
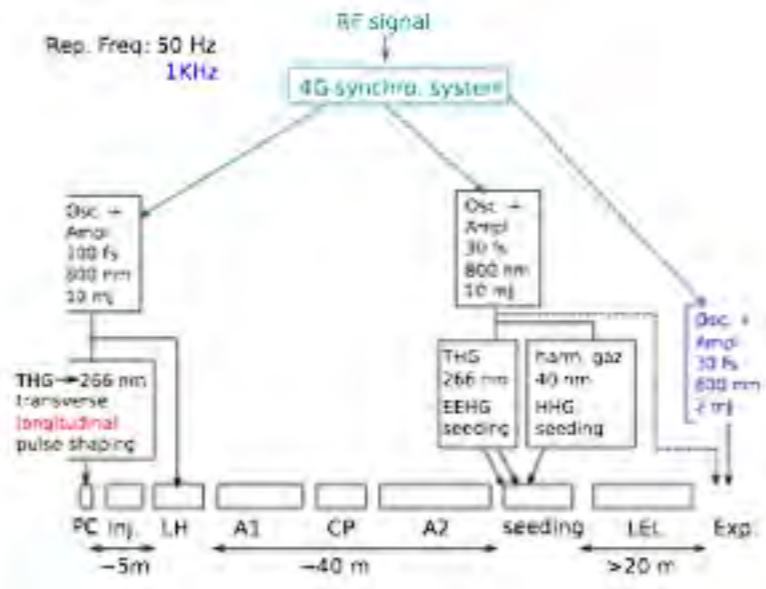
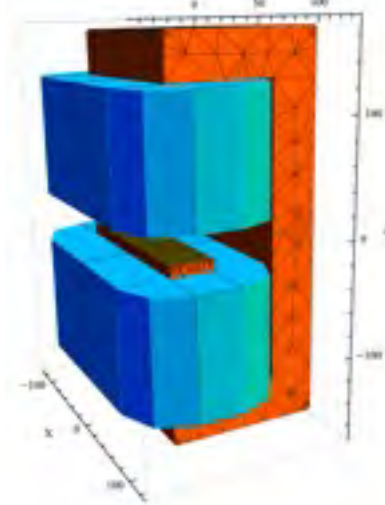
Number of dipoles 4

Length : 1.2 (0.8) m

Gap: 25 mm

Bz 0.38 (0.35) T

L_d: 150 (100) mm

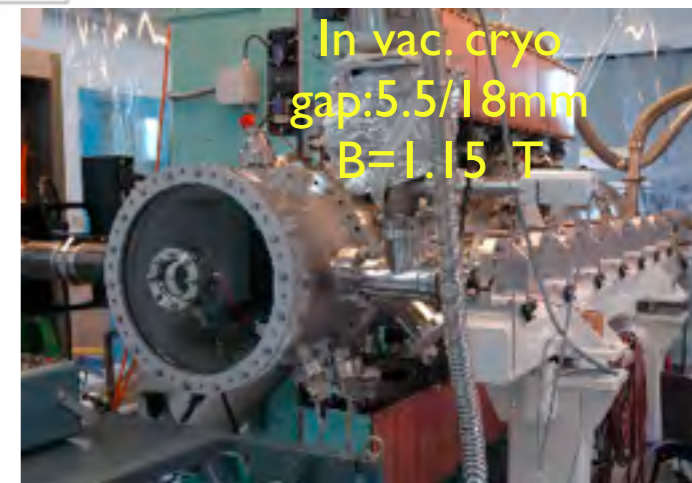
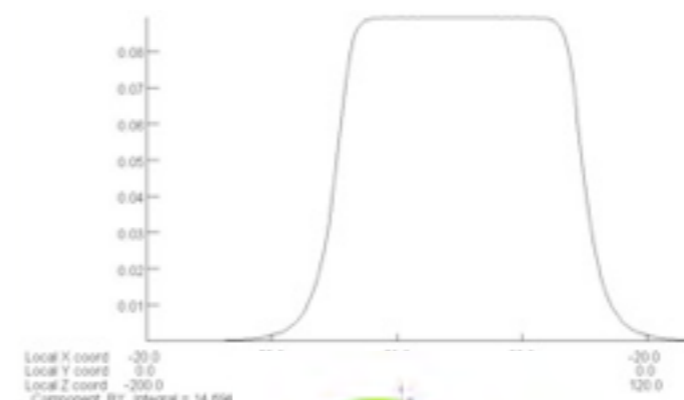
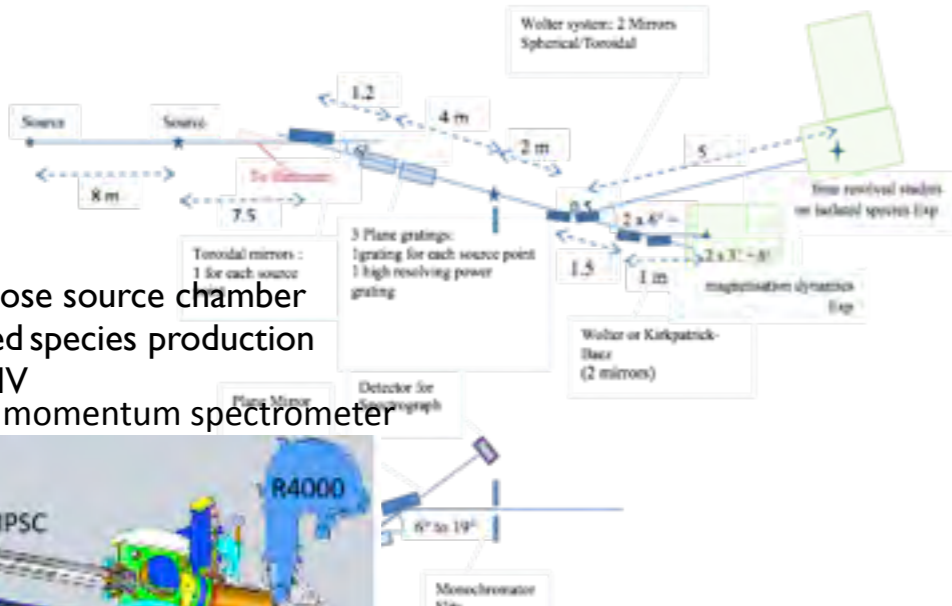


CILEX (Centre Interdisciplinaire du Lumière Extrême) :

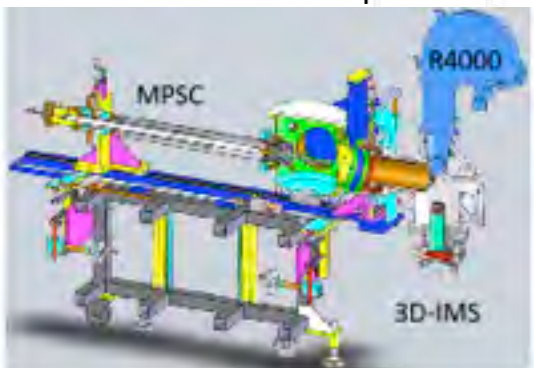
- APOLLON laser 10 PW
- LUIRE
- «Proximity centers» : LOA Salle Jaune : 2 beams of 60 TW each, UHI 100, LASERIX...

www.lunex5.com

Composants de LUNEX5



Multipurpose source chamber for isolated species production under UHV
Full 3D ion momentum spectrometer



Condensed matter user station

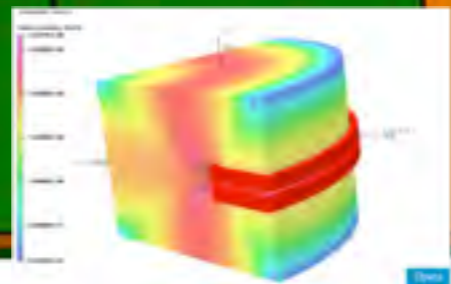
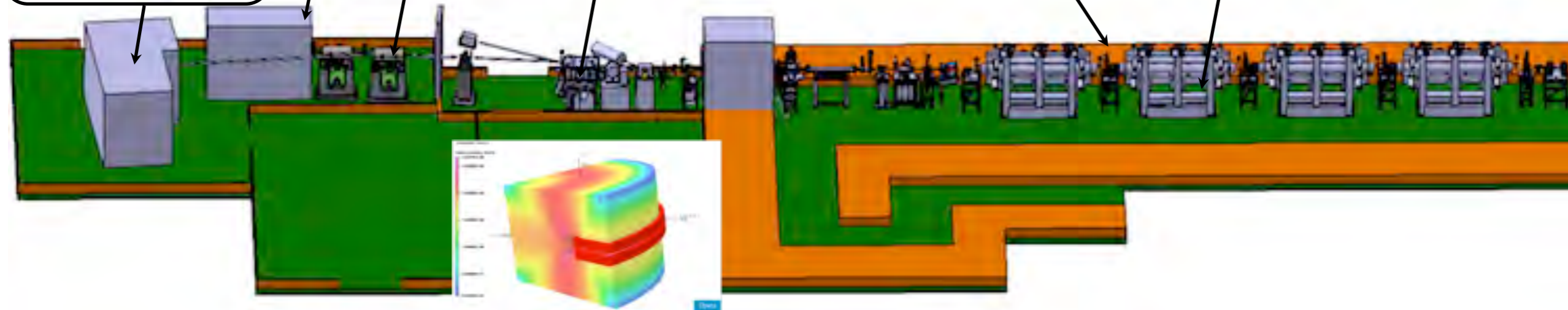
Quadrupole : 6T/m, 150 mm length, $\varnothing = 25$ mm

Echo radiators : in-vacuum cryo-ready undulators period 15 mm

Isolated species user station

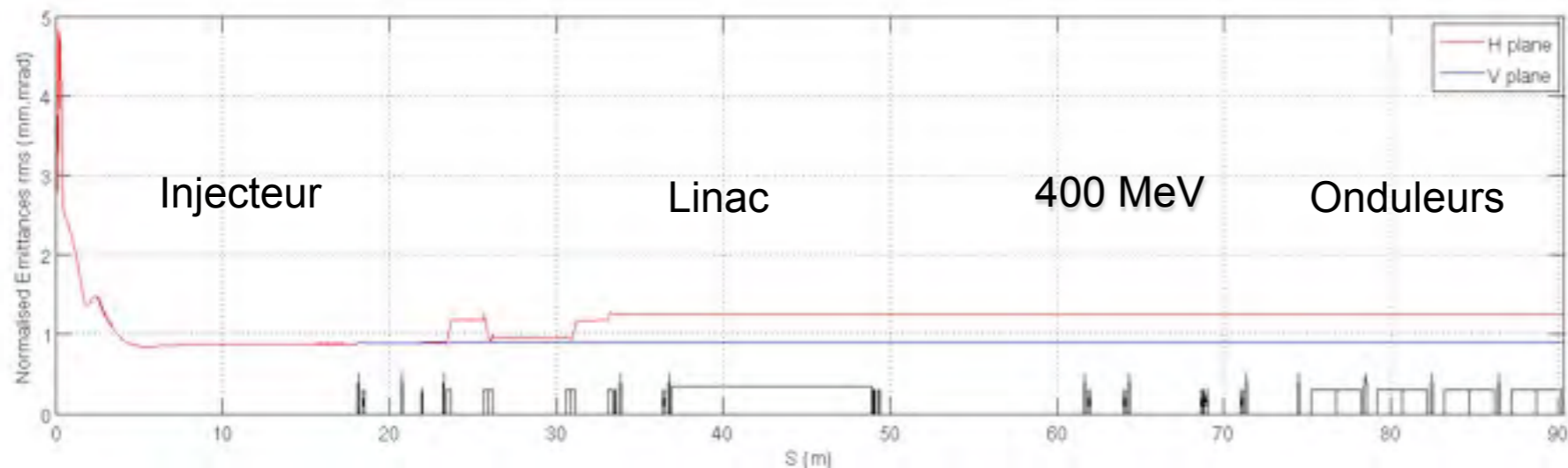
Monochromator

Beam dump dipole

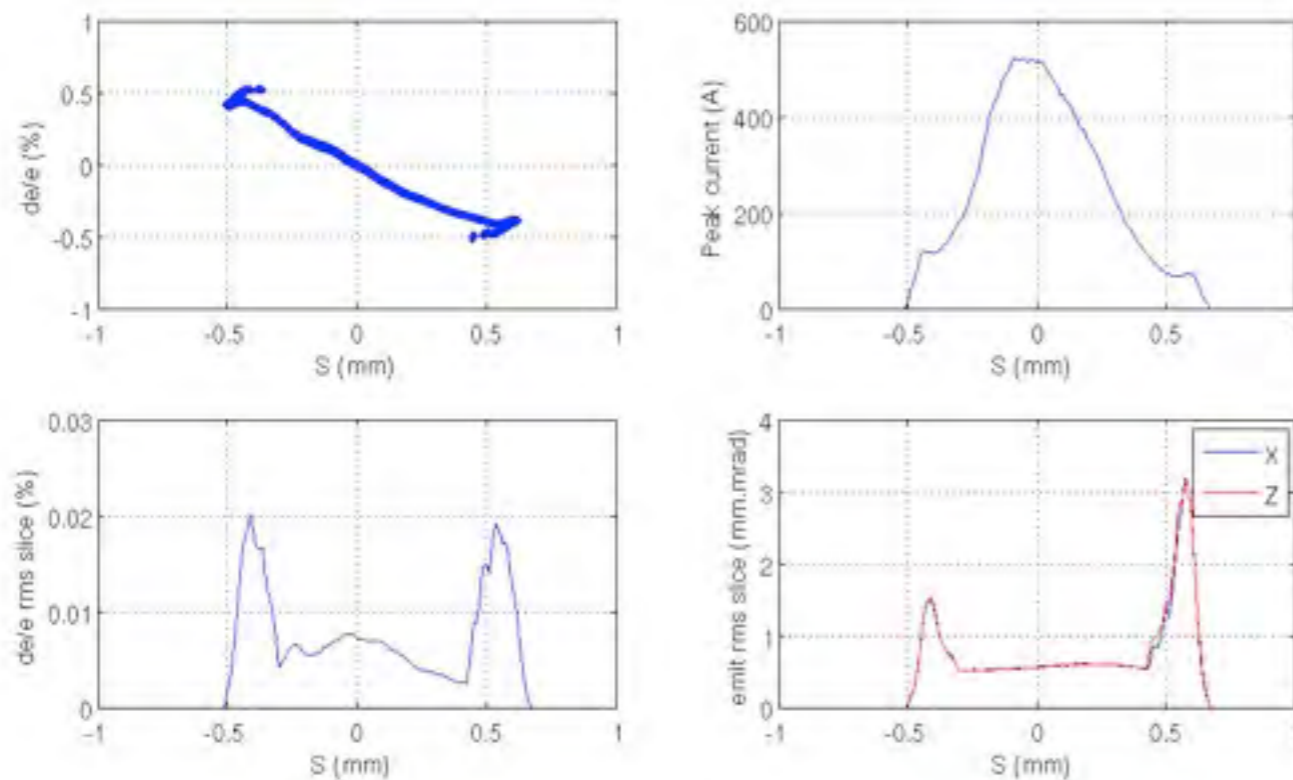


TA

Dynamique du faisceau d'électrons du linac supra



Final slice parameters (1 nC)



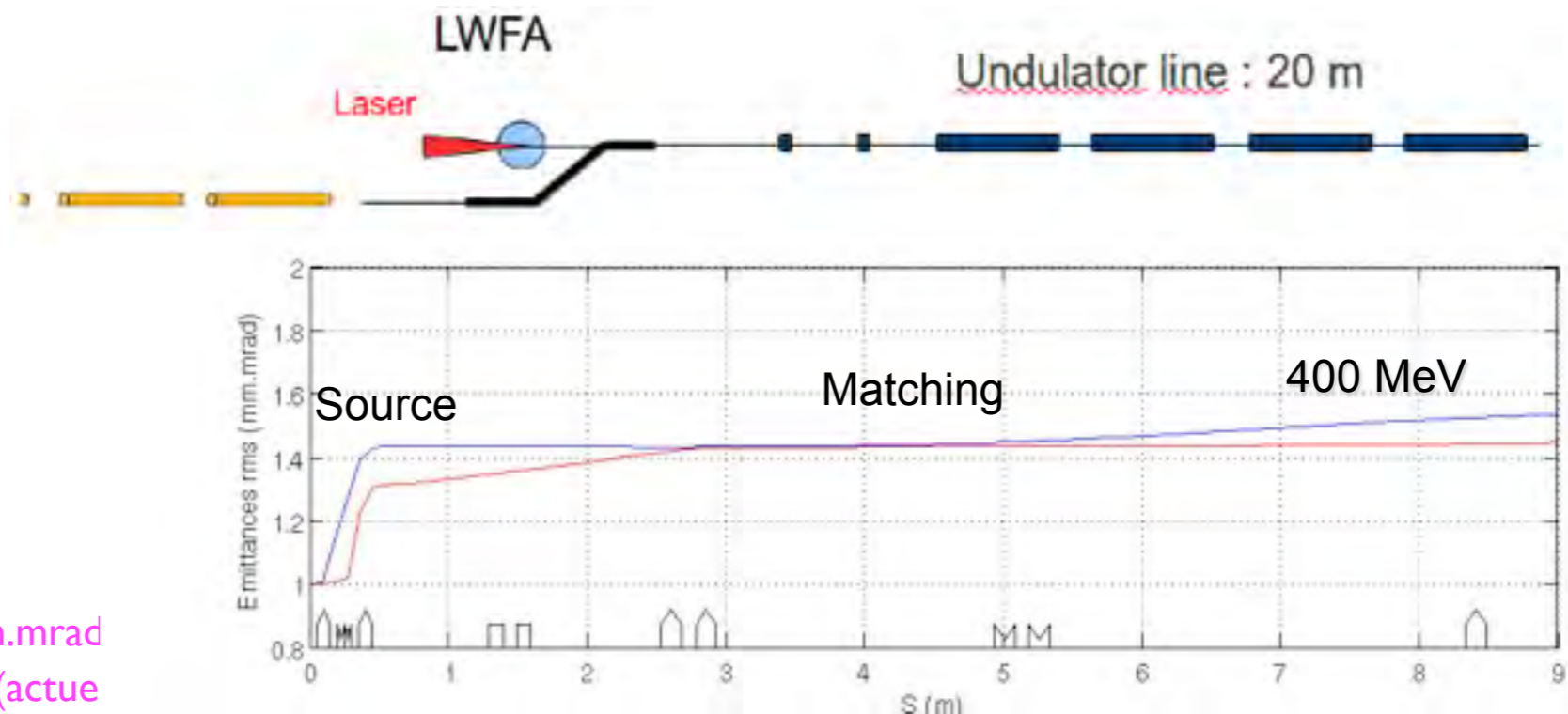
CLA@ undulator entrance

Modélisation « complète » du faisceau le long du CLA et adaptation au niveau des onduleurs

Faible émittance $< 1 \cdot 10^{-6}$ mrad
 Faible dE/E $< 1 \cdot 10^{-4}$
 Durée FWHM ~ 0.5 ps
 400 – 800 A crête

www.lunex5.com

Cas d'un LWFA optimiste



Énergie : entre 0.4 et 1 GeV
 Quelques fs
 Fort courant crête : 10 kA
 Émittance normalisée $\gamma\epsilon = 1 \pi$ mm.mrad
 Dispersion en énergie : entre 1 % (actue et 0.1 % (valeur visée)

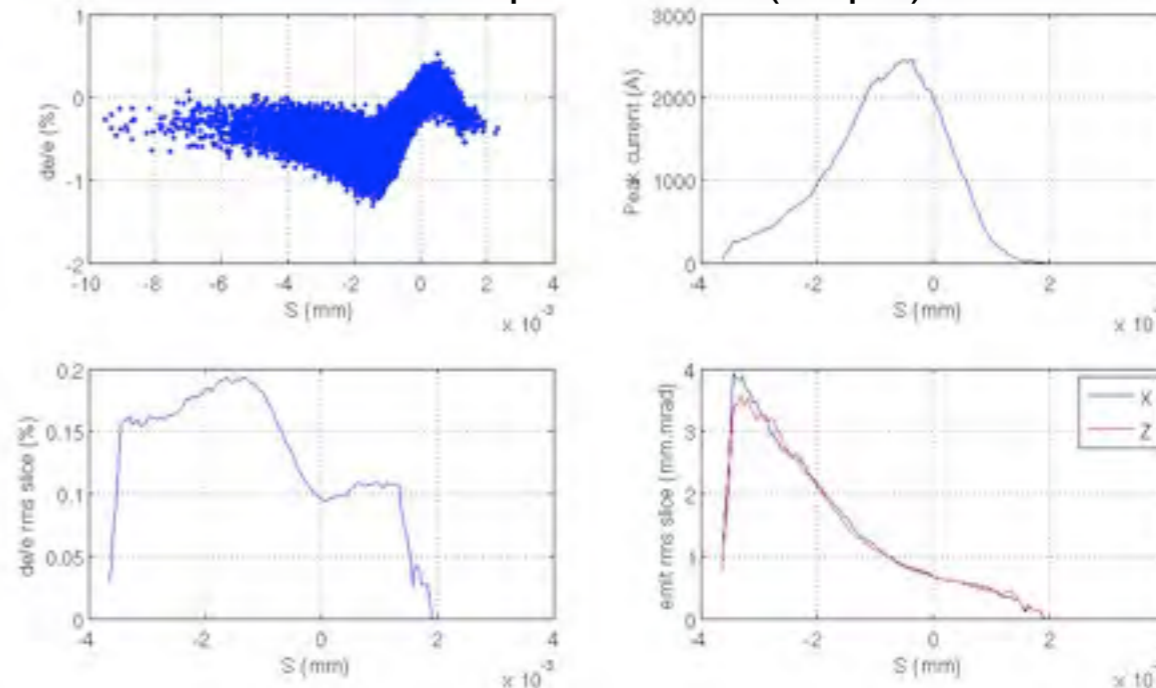
Injection au niveau du dogleg

pompage différentiel

Modélisation du faisceau LWFA et adaptation au niveau des onduleurs

Emittance contenue $< 4 \cdot 10^{-6}$ mrad
 dE/E contenu $< 2 \cdot 10^{-3}$
 Durée FWHM ~ 10 fs
 >2000 A crête

Final slice parameters (20 pC)

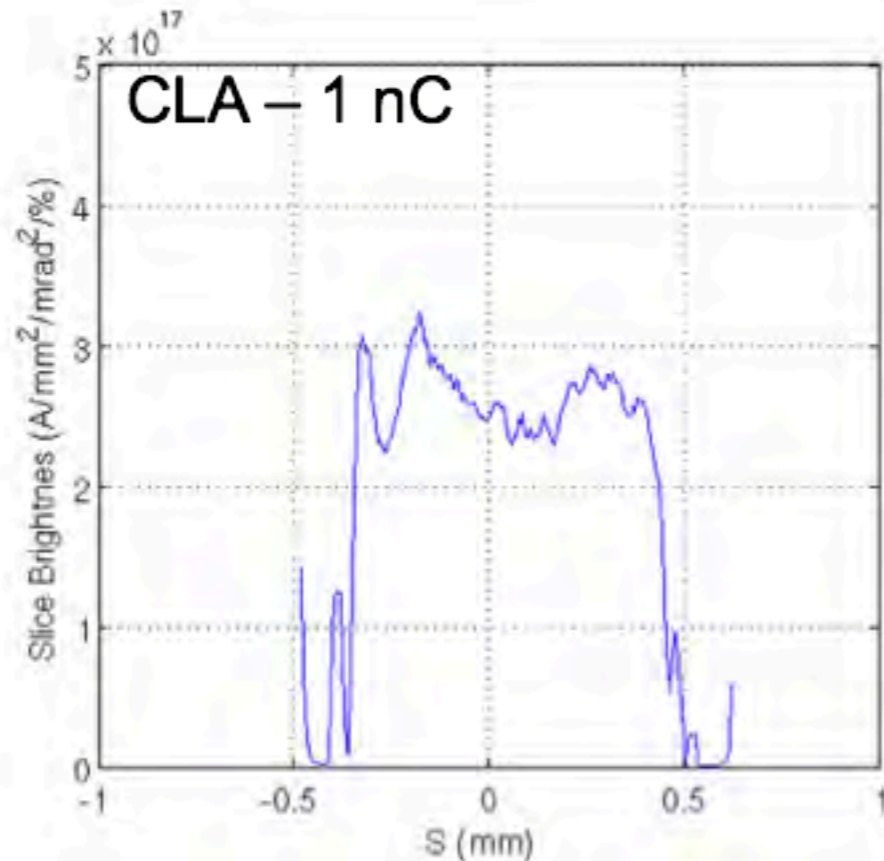


Performances CLA et LWFA comparées

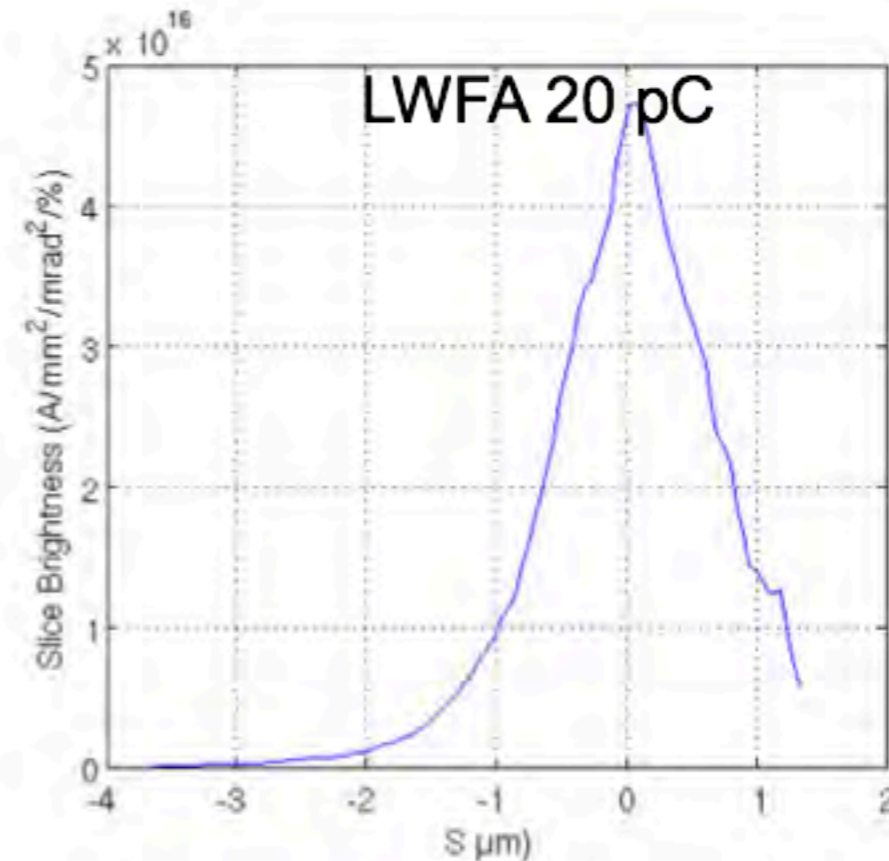
$$B_s = \frac{2I}{\left(\epsilon_{sx} \epsilon_{sz} \sigma_{se} \right)}$$

Size	Divergence	Norm. Emittance	Length	E-spread	Q	Peak current
1 μm	1.25 mrad	1 π.mm.mrad	2 fs	0.1%	20 pc	4 kA

LWFA : 1 Hz, 400 MeV et davantage.



2-3 10¹⁷



4-5 10¹⁶

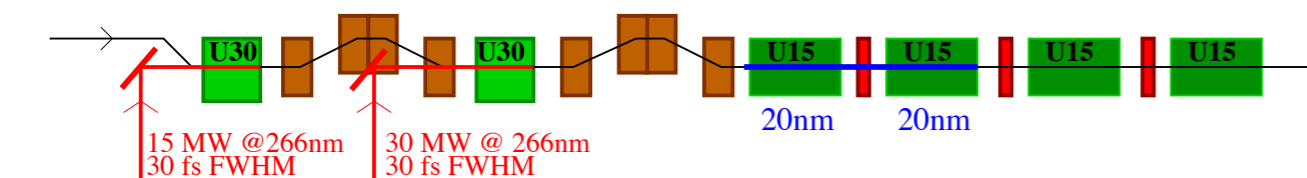
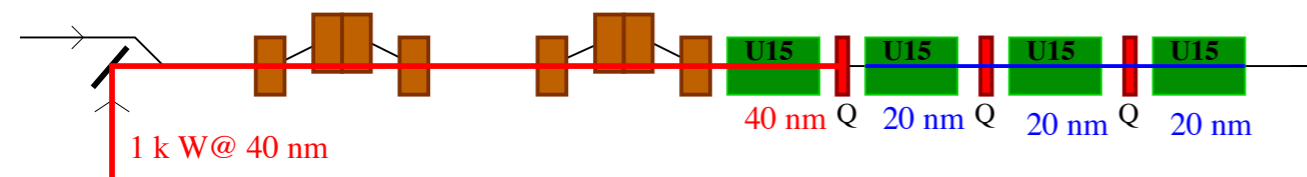
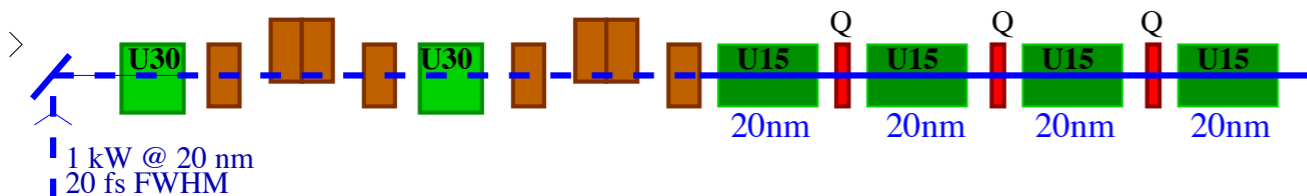
Brillances assez comparables

Technologie mature, stable, base solide et fertile pour développer une interaction LEL avancée (HHG, EEHG...)

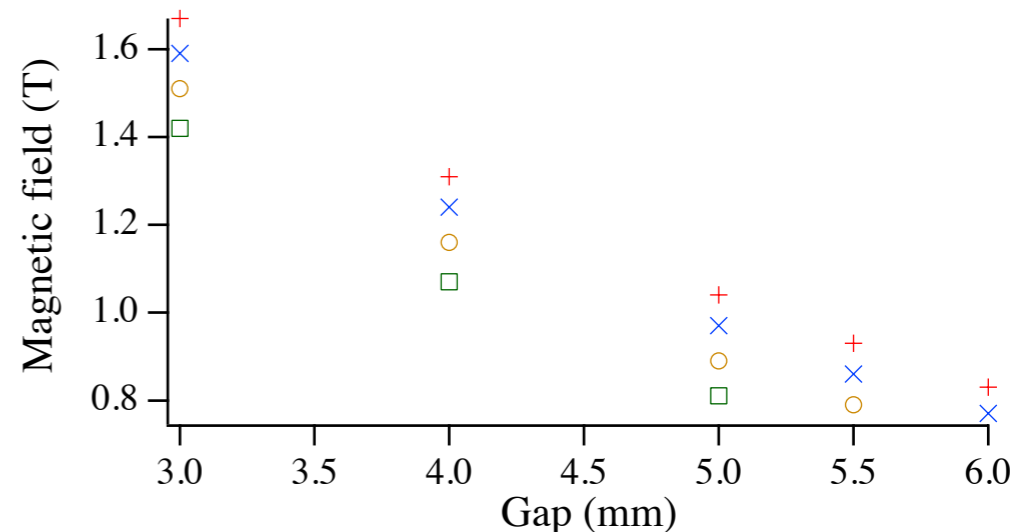
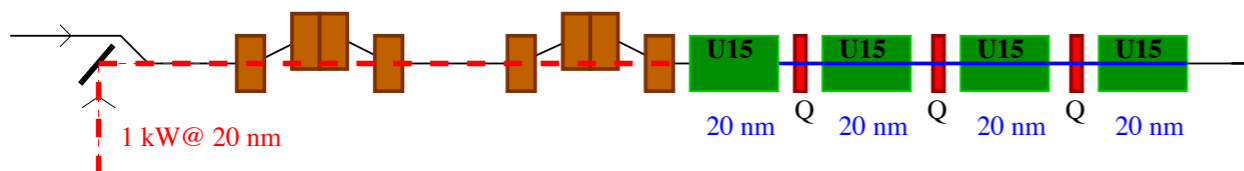
Nouvelle technologie prometteuse, à qualifier sur une application laser à électrons libres
 Si la dispersion en énergie est bien de 0.1 %, alors possible single spike LEL possible.
 => revoir le transport en partant de 1 % de dispersion en énergie

Sources LEL sur LUNEX5

CLA : 400 MeV, 0.02% energy spread, 1.5π mm.mrad, 400 A, 1 ps rms



LWFA : 400 MeV - 1 GeV, 0.1% energy spread, 1π mm.mrad, 10 kA, 2 fs rms



Amplifier @ 20 nm,
après 3 sections $z = 11$ m, 50 MW, 30 fs FWHM, signal/ noise= 3

Cascade @ 20 nm,
saturation après 3 sections $z = 11$ m, 100 MW, 25 fs FWHM, FT

Echo @ 20 nm,
saturation après 2 sections $z = 7$ m, 65 MW, 24 fs FWHM, FT

dispersion en énergie : 0.5 %, 20 fs rms;

@ 20 nm; no saturation après 3 sections, < MW, > 35 fs FWHM

dispersion en énergie : 0.1 %, 20 fs rms;

@ 20 nm; pas de saturation après 3 sections, 10 MW, > 20 fs FWHM

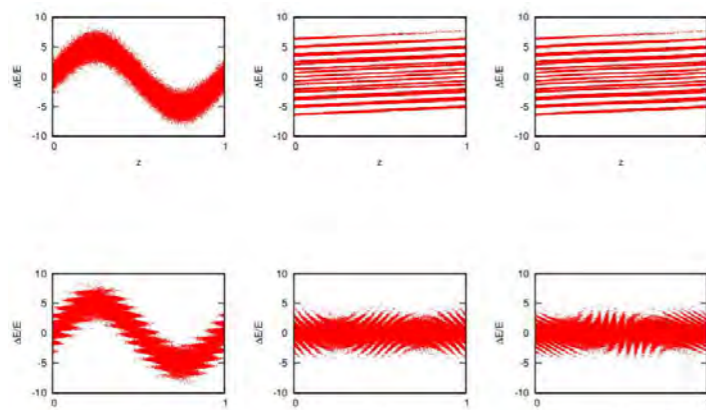
dispersion en énergie : 0.1 %, 2 fs rms;

SASE @ 20 nm, saturation après 2 sections $z = 7$ m, 2 GW, 7 fs FWHM, single spike

Au delà de LUNEX5 avec linac conventionnel avec TMC

Calcul time-dependent

=> Vers des sources compactes LEL à la limite de Fourier : exemple de la Triple Modulator Chicane

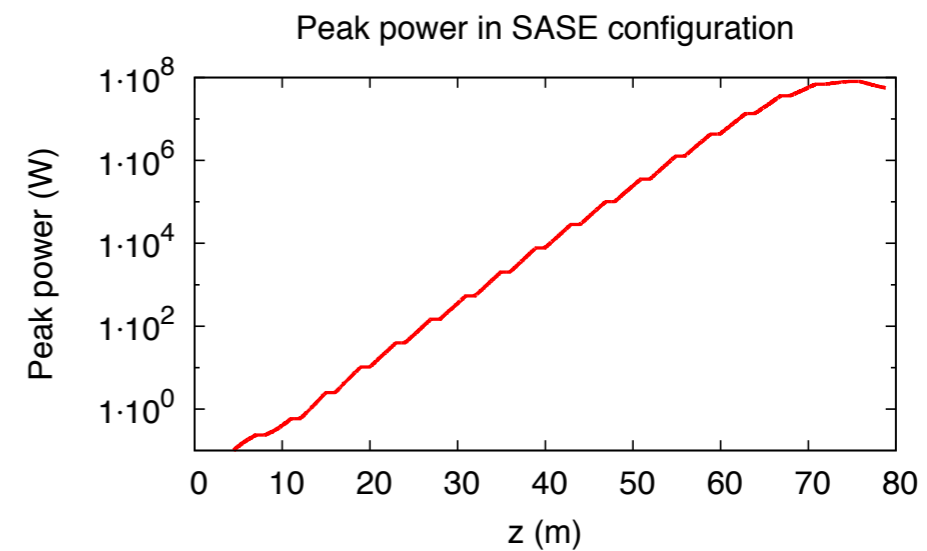
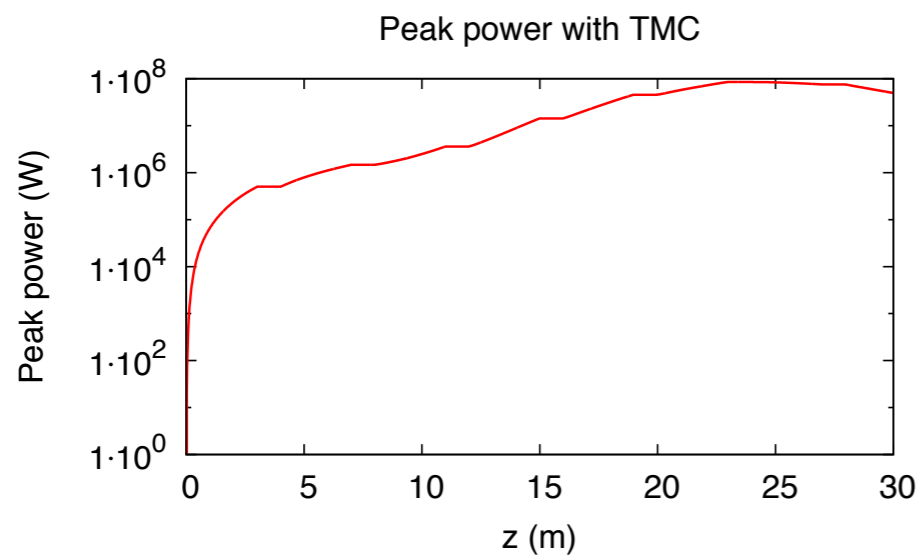


On pourrait encore à terme réduire la longueur d'onduleur par une triple interaction laser/HHG onduleur

Cas d'un LUNEX5 upgradé à 1.5 GeV à 1.3 nm : réduction de la longueur d'onduleur de 80 m à (SASE) à 20 m (TMC)

=> Réduction de taille et de coût

Ex : TMC @ 1.3 nm @ 1.5 GeV



-DAM/DPTA

Phase actuelle du projet

extrait du rapport du comité de revue:

«The committee congratulates the project team on the impressive progress achieved in the limited time available.

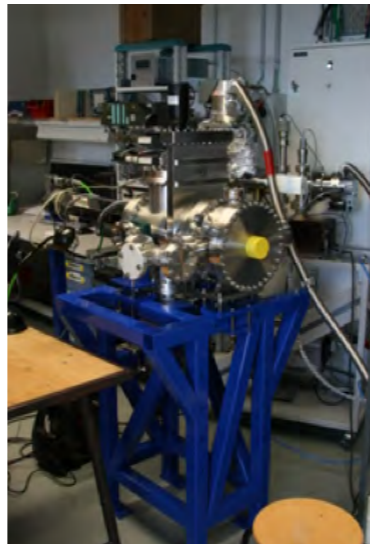
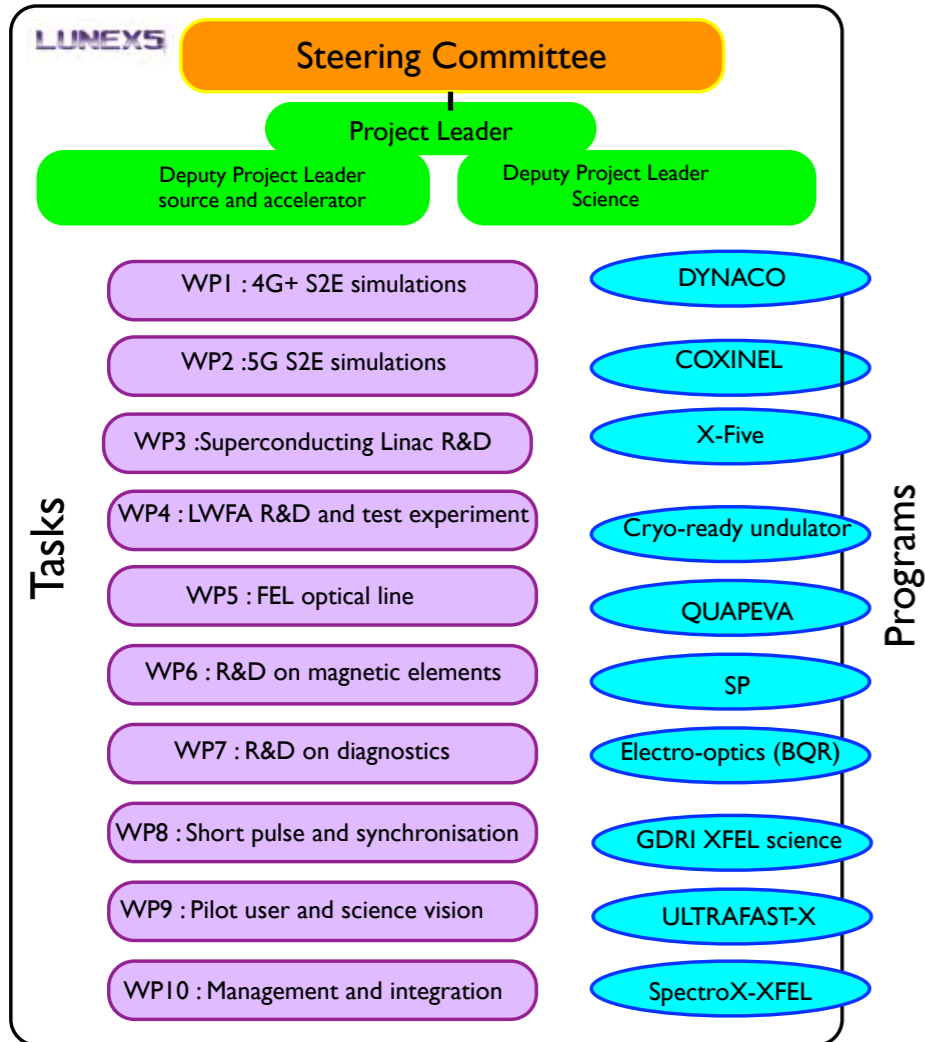
The committee supports the scientific relevance of the proposal. LUNEX5 will open new scientific opportunities in France for seeding and first pilot experiments. It could demonstrate the first operational LWFA linac and FEL.

The committee is confident that all technical feasibility issues have been identified and will be further addressed in the TDR. The proposal is challenging and sound.»

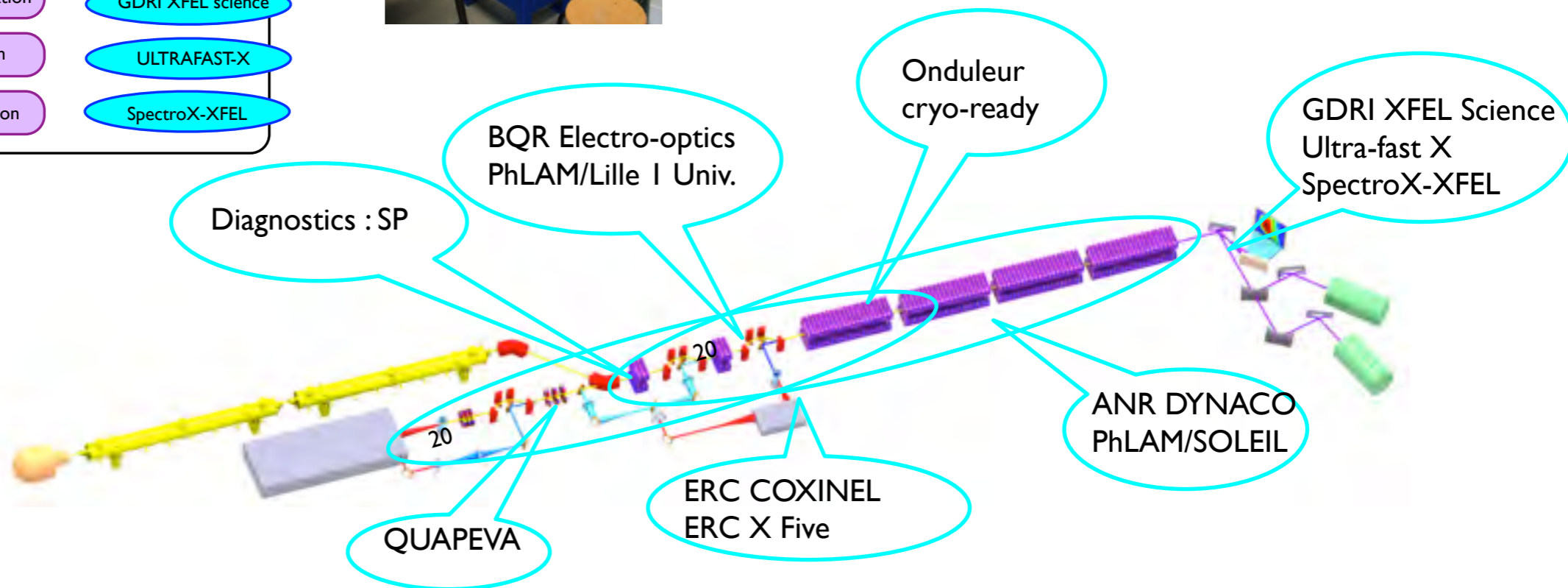
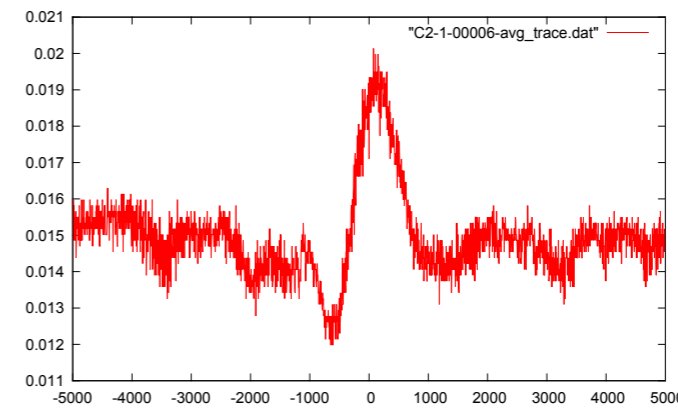
PHASE d'études complémentaires et de R&D associée

- Lancer des programmes de R&D et rechercher les fonds pour cette R&D
- Poursuivre les études complémentaires, en particulier en suivant les recommandations du comité de revue

Organisation en tâches et programmes



Programmes

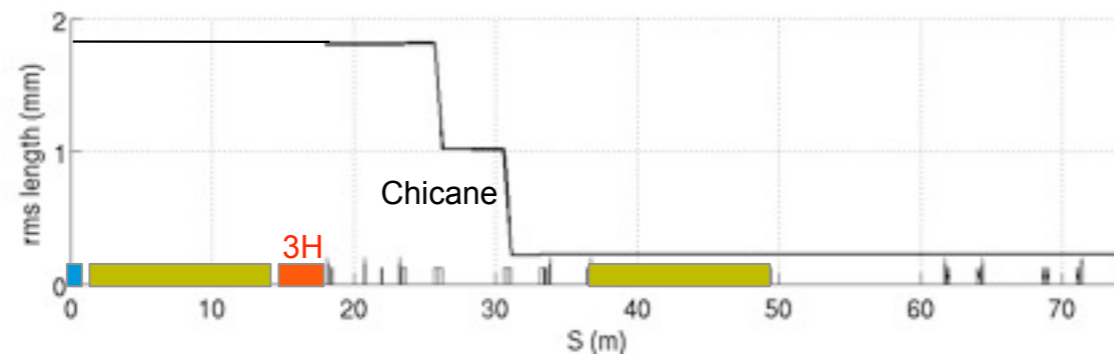


Vers LUNEX5 à haute cadence en linac froid

Dynamique faisceau

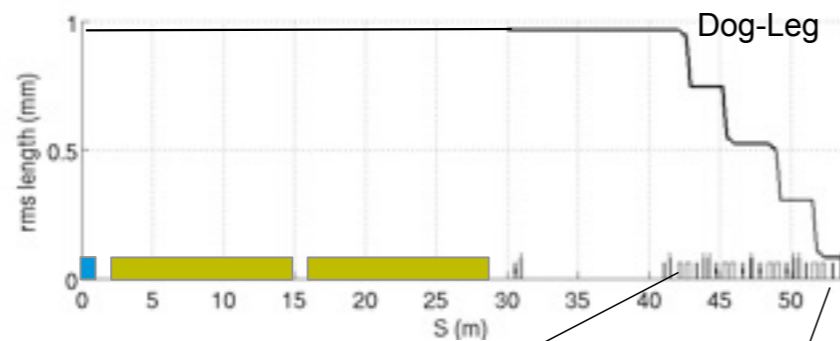
Simplification et raccourcissement de la chaîne accélérateur sur le linac supraconducteur

Compression schemes



Standard compression scheme :

with a third harmonic (3H) linearizer
+ a chicane to compress

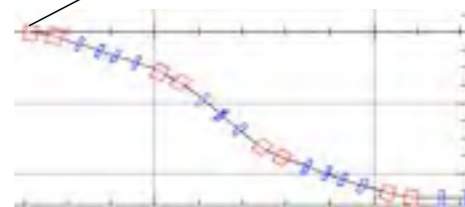


Variation based on a dog-leg :

Much compact (~ 15 m gain)
Less expensive (no 3H cavity)
But less versatil

Dog-leg + sextupoles :

- To compress the bunch
- To linearize the long. phase space
- To cancel second order dispersion



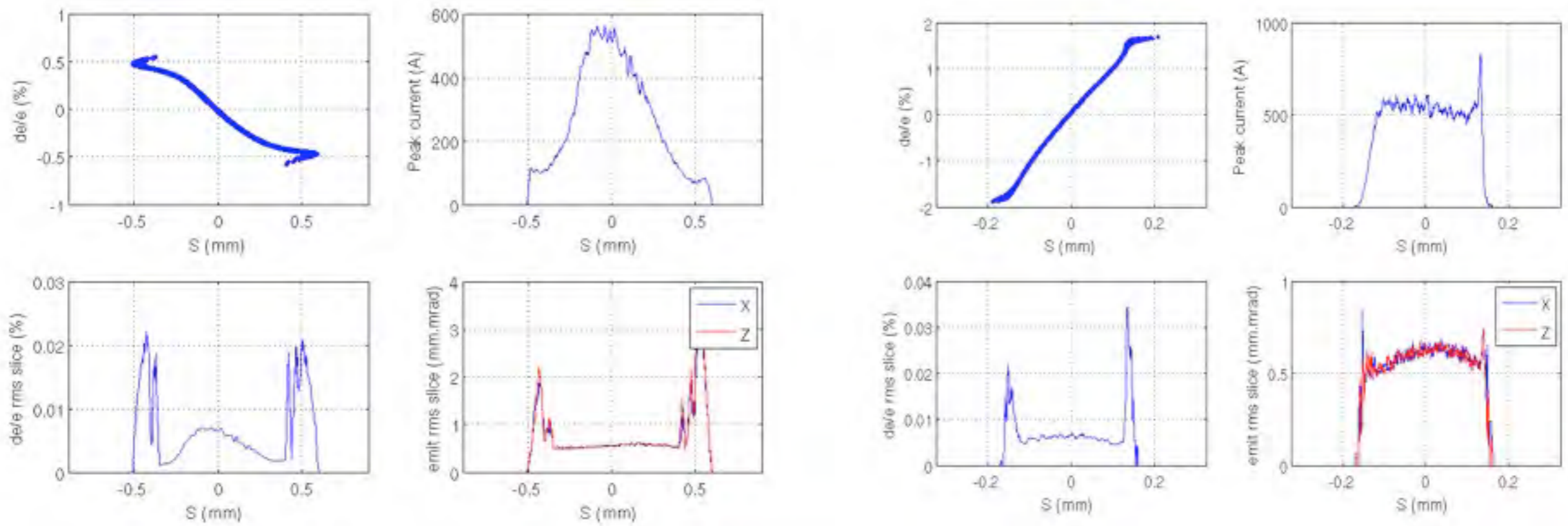
Works at CEBAF ...
Planned at MAXIV linac

Vers LUNEX5 à haute cadence en linac froid

Dynamique faisceau

Compression schemes

Bunch characteristics at undulator line entrance with a bunch compression by ~ 10 from 50 to ~ 500 A pic current



3H + chicane

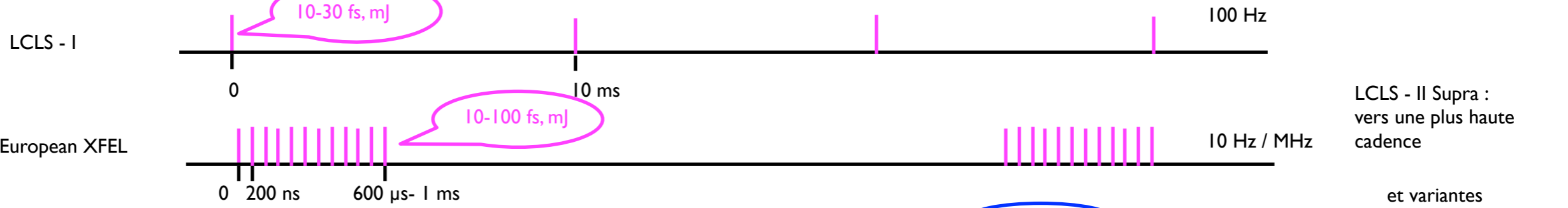
Dog-Leg + sextupoles

==> very similar
(Energy chirp reversed)

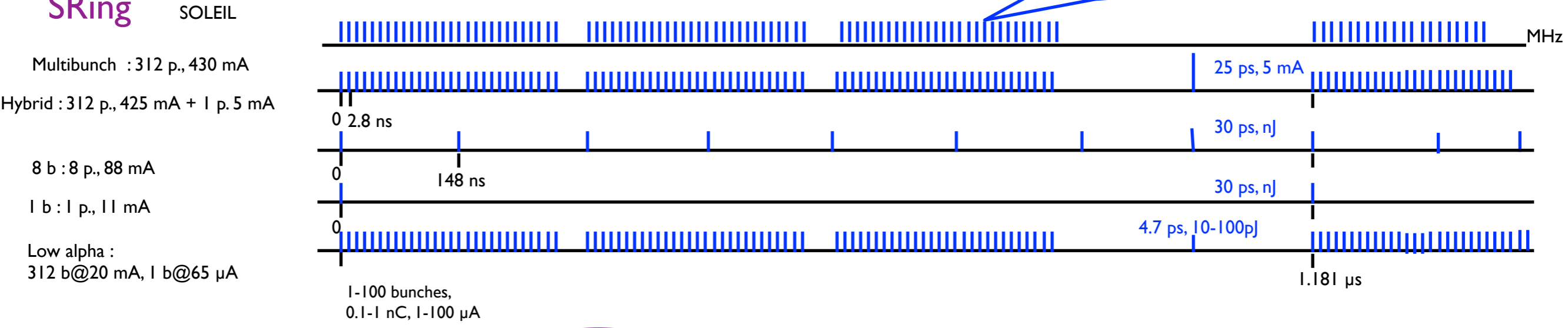
www.lunex5.com

Vers LUNEX5 à haute cadence en linac froid

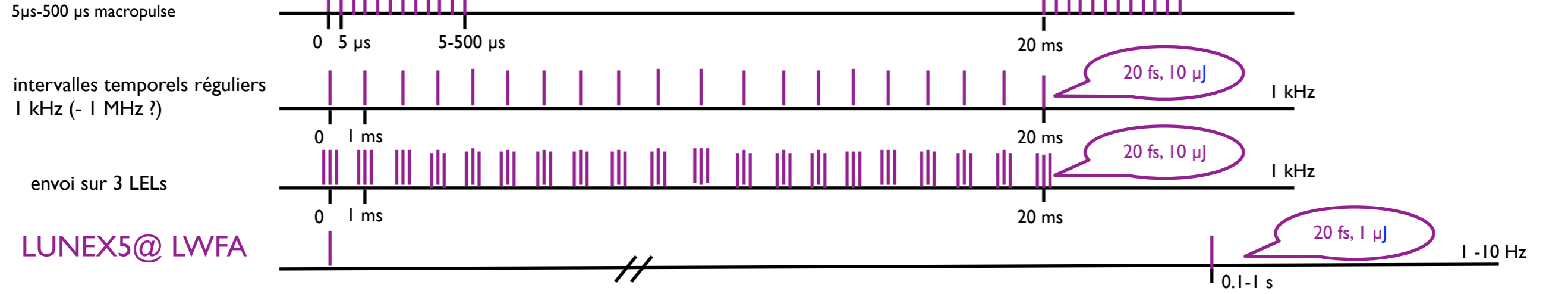
FEL



SRing



LUNEX5@ linac froid



Vers LUNEX5 à haute cadence en linac froid

Quelle structure temporelle idéale?

Il semblerait que côté utilisateurs des impulsions à intervalles régulier (kHz?) soit préférable à une structure avec des macro-impulsions contenant des micro-impulsions

Domaines scientifiques pour la «haute cadence» :

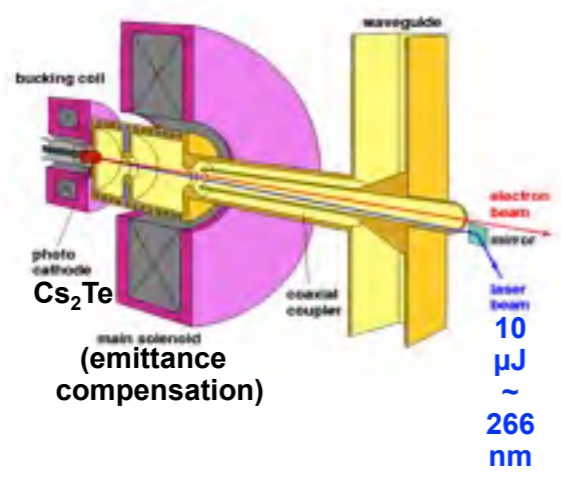
- expériences de coïncidences (phase gaz),
- photo-émission pour limiter la charge d'espace,
- imagerie en diffraction cohérente
- ...

Contraintes :

- mise en place du champ RF dans les cavités et suppression
- installation cryogénique
- cadence des lasers de seeding devant être compatible avec celle des électrons
- systèmes de synchronisation

Vers LUNEX5 à haute cadence en linac froid Canon supraconducteur ?

Choix 2011



Remise en question du choix du canon DESY Zeuthen suite à l'avancée des canons supraconducteurs

Ex de canons supra...

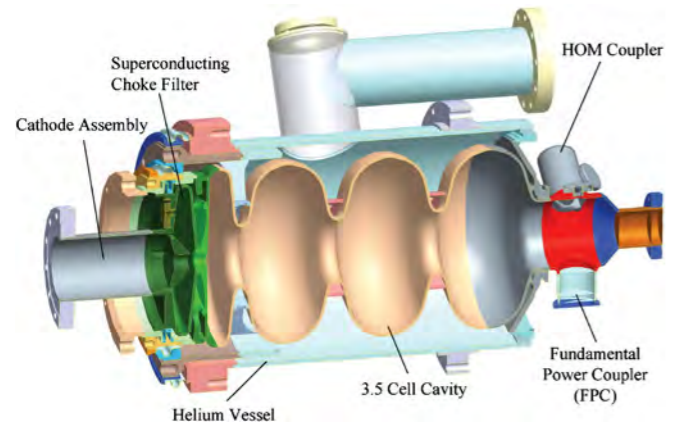


FIG. 2. 1.3 GHz—3.5 cells TESLA shaped FZD SRF gun cavity.

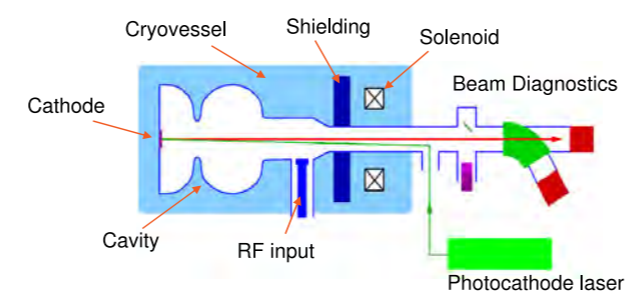


FIG. 9. Generic design of the 1.3 GHz 1.6 cell BERLinPro SRF gun. Courtesy of Thorsten Kamps, HZB.

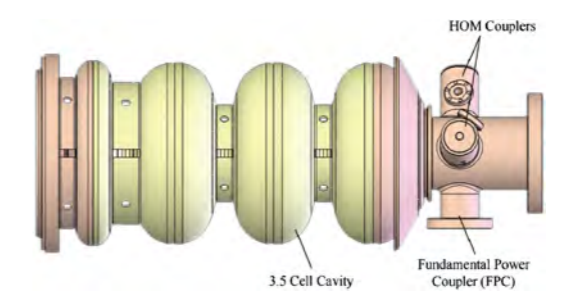


FIG. 11. 1.3 GHz—3.5 cell IHIP SRF gun cavity. Courtesy of Kexin Liu, PKU.

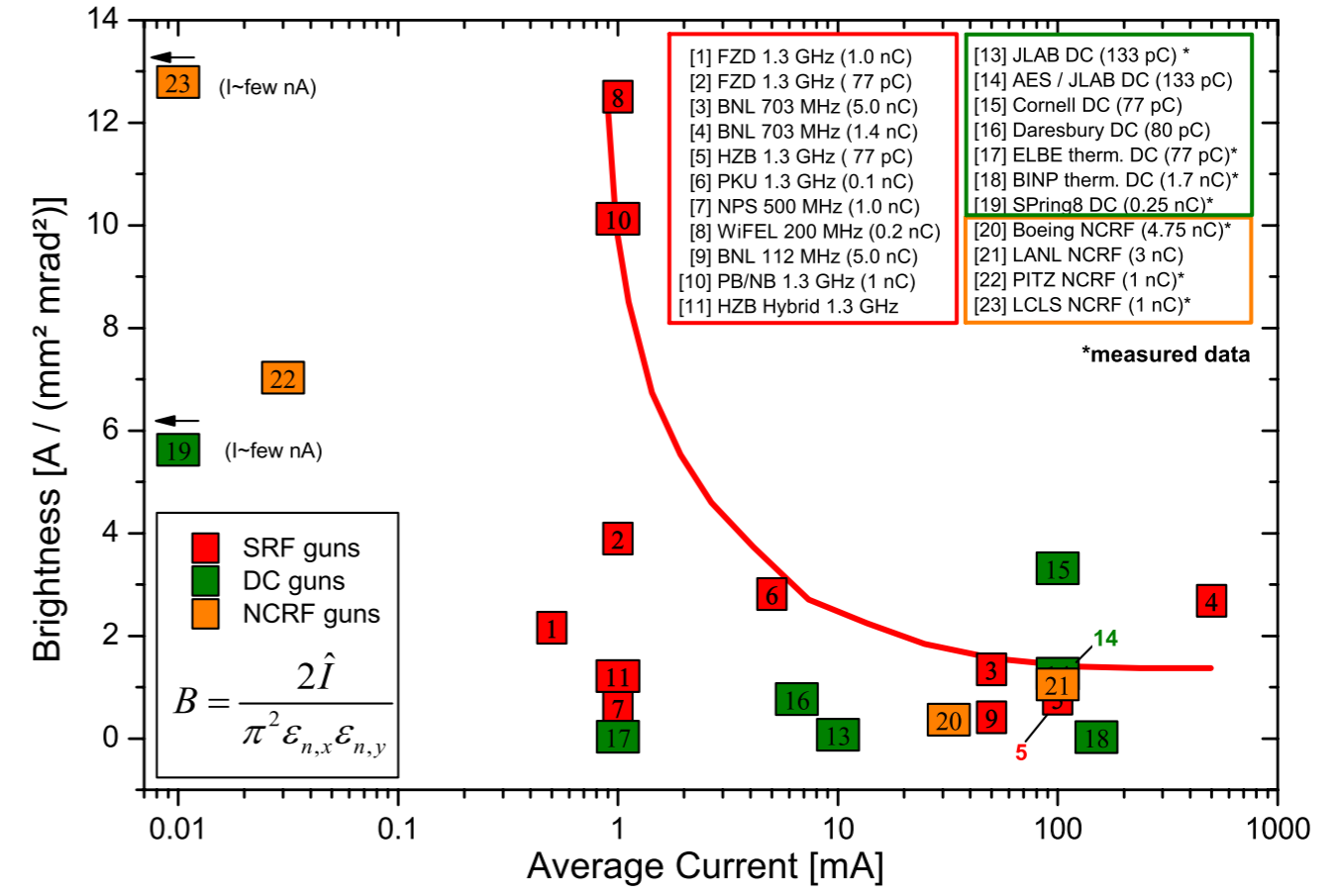


FIG. 18. Comparison of some electron sources by plotting bunch brightness versus average current. The colored squares are representing the three types of guns. An anticipated trend for SRF guns is shown by the red curve.

A. Arnold, J. Teicher, Overview on superconducting photoinjectors, PRSTAB 14, 024801 (2011)
 J. Teichert et al., Journal of Physics, Conf. series 298 (2013) 012008
 J. Teichert et al. Proc. FEL 2013, New York, USA, 136 (2013)

Vers LUNEX5 à haute cadence en linac froid

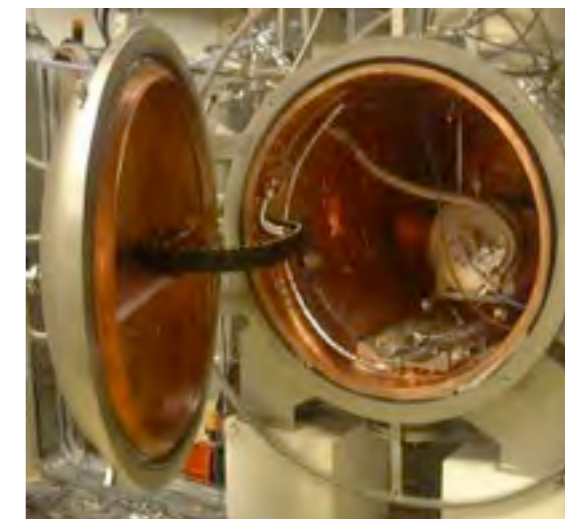
Étude de la cellule RF élémentaire en mode continu

Collaboration : CEA-SACM et SOLEIL

Projet de réalisation et validation par un tests à froid dans la station cryogénique, CryHolab du CEA, de l'ensemble RF élémentaire proposé pour LUNEX5, qui comprend :

- une cavité de 9 cellules du type XFEL, modifiée pour l'opération en CW et ses composants associés
- un amplificateur à transistors de 15 kW à 1.3 GHz;
- un système RF bas niveau avec sa partie synchronisation.

Développement en interne mettant à profit l'expérience acquise par SOLEIL dans le domaine des amplificateurs de puissance UHF et celle de CEA-SACM en cavités froides



* SOLEIL est pionnier pour la conception, la réalisation et l'exploitation d'amplificateurs de haute puissance UHF transistorisés

Signature d'un accord de transfert de savoir-faire concernant des amplificateurs radio-fréquence à transistors entre SOLEIL et Sigmaphi Electronics, le 5 décembre 2013

Vers LUNEX5 à haute cadence en linac froid Étude de la cellule RF élémentaire en mode continu

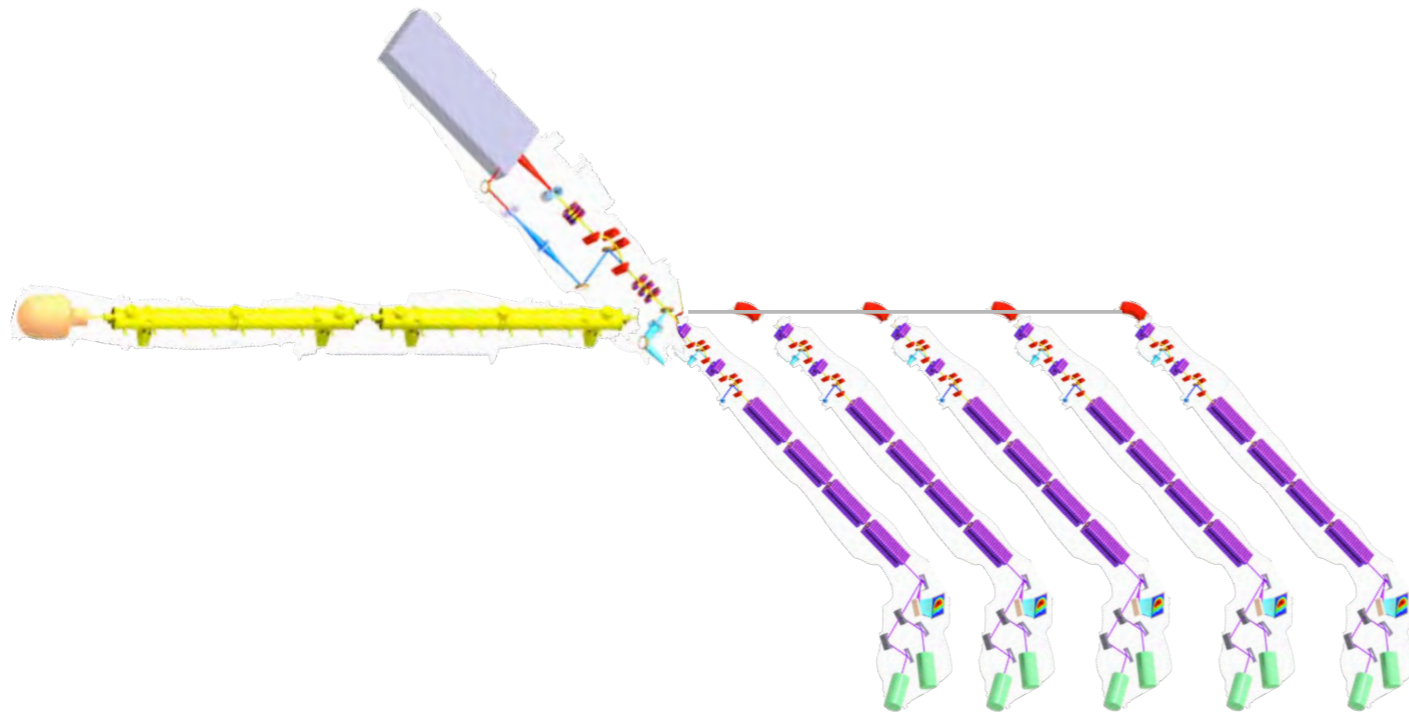
Tasks	Year1				Year 2				Year 3			Year 4
Task 1: Cavity and accessories												
<i>Task 1.1: 9-cell cavity</i>												
<i>Task 1.2: Tuner</i>												
Task 2: Fundamental and HOM couplers												
<i>Task 2.1: Couplers desing and manufacturing</i>												
<i>Task 2.2: Fundamental coupler power processing</i>												
Task 3: Integrated RF Test in Cryolab												
Task 4: Development of 1.3 GHz amplifier												
Task 5: Development Low Level RF electronics												
Task 6: Reference pilot user experiment												

Proposition déposée à l'interlabex : infructueux.

- mieux discuter comparaison avec projets ayant des ambitions similaires
- mieux argumenter les choix et budgets
- renforcer l'argumentation de l'intérêt scientifique pour PALM

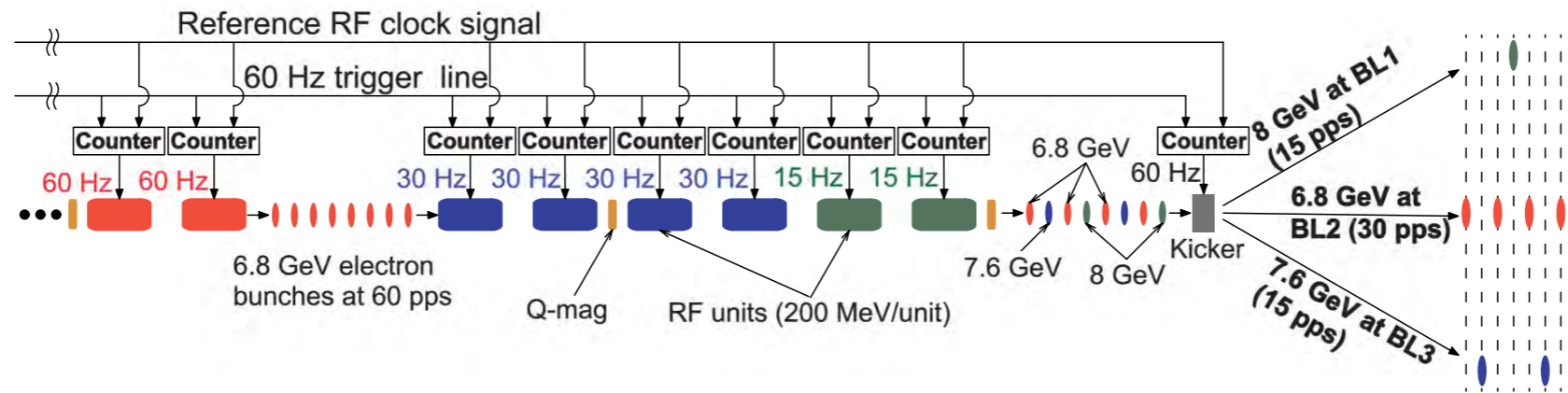
Vers LUNEX5 à haute cadence en linac froid vers l'étude d'un kicker vers un mode multi-user

But : réduire les coût de fonctionnement d'une installation LEL en augmentant le nombre d'utilisateurs simultanés



à étudier :

- spécifications sur l'angle de déviation et le temps de switch
- biblio sur les solutions techniques (RF, magnétique)
- première conception
- dispatcher avec des énergies différentes?



T. Hara et al., Time interleaved multienergy acceleration for a X-ray Free electron facility, Phys. Rev. Spec. Topics AB, 16, 080701 (2013)

Vers une démo d'amplification LEL avec LWFA

COXINEL (ERC Advanced) vise à démontrer l'amplification Laser à Électrons Libres avec les performances actuelles des LWFA avec un laser TW existant

WP2, WP4

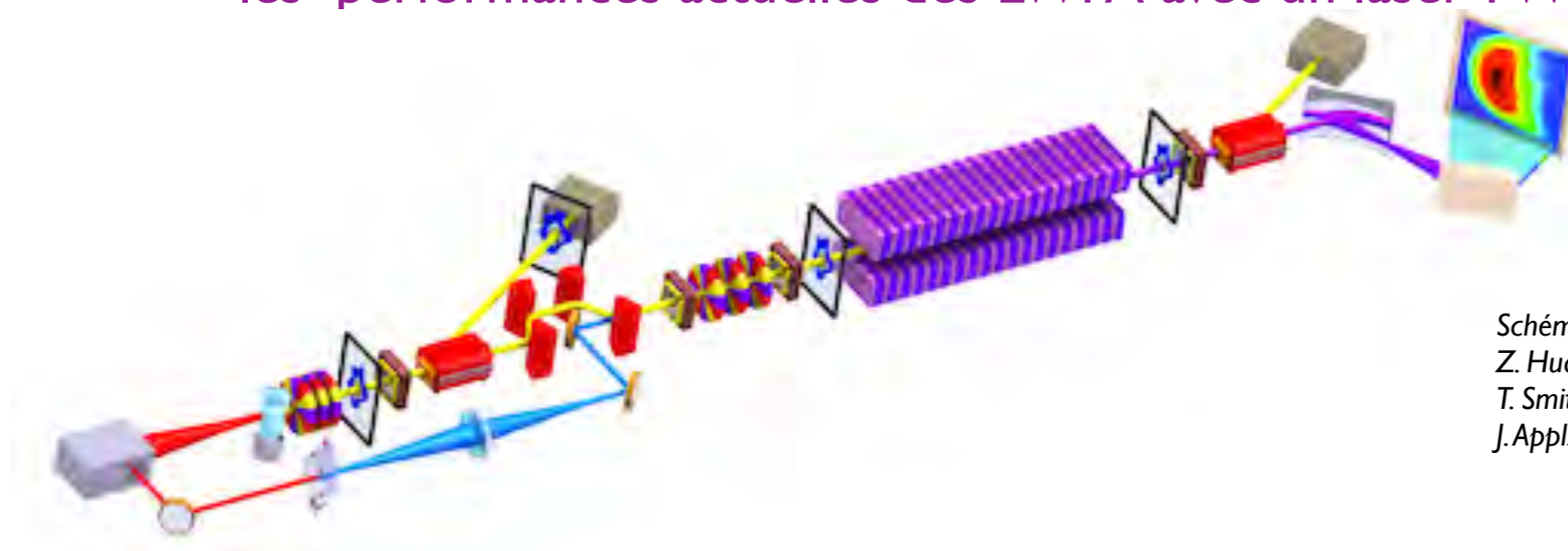


Schéma par onduleur à gradient transverse :
Z. Huang et al., *Phys. Rev. Lett.* 109, 204801 (2012)
T. Smith, J. M. J. Madey, L. R. Elias, and D. A. G. Deacon,
J. Appl. Phys. 50, 4580 (1979)

Objectif 1 :

démontrer un transport approprié de la source à l'onduleur

Objectif 2 :

démontrer l'amplification LEL à 200 nm puis à plus courte longueur d'onde

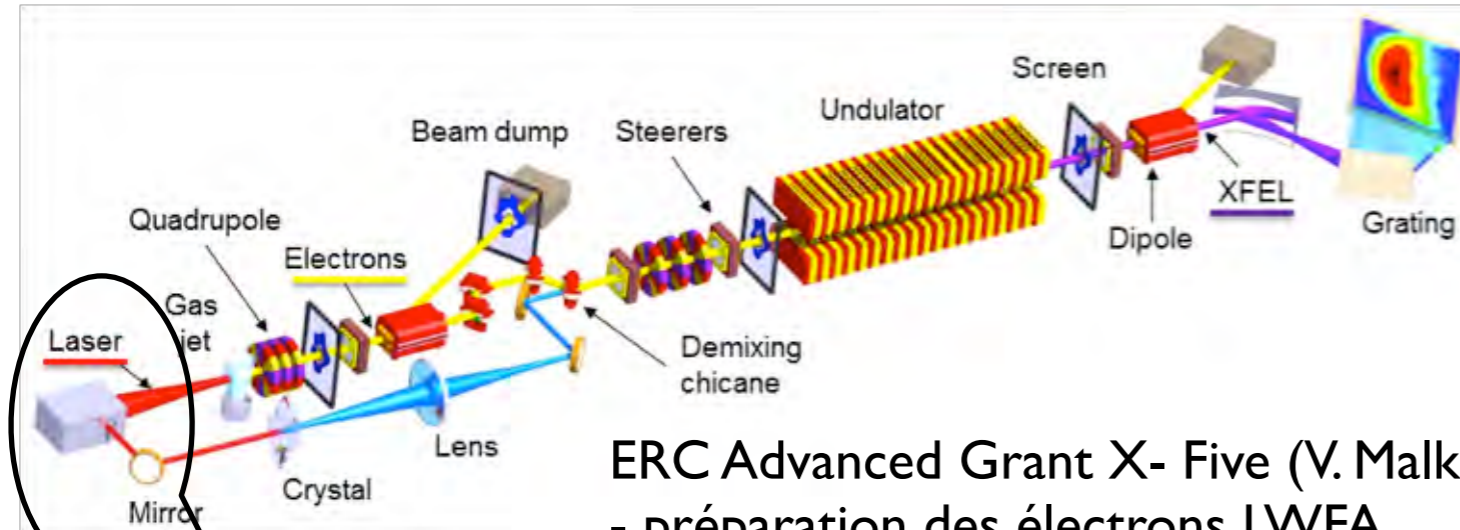
Objectif 3 :

investigation et contrôle (théorique / expérimental) des performances d'un LEL sur LWFA (seeding, polarisation...)

La source d'électrons

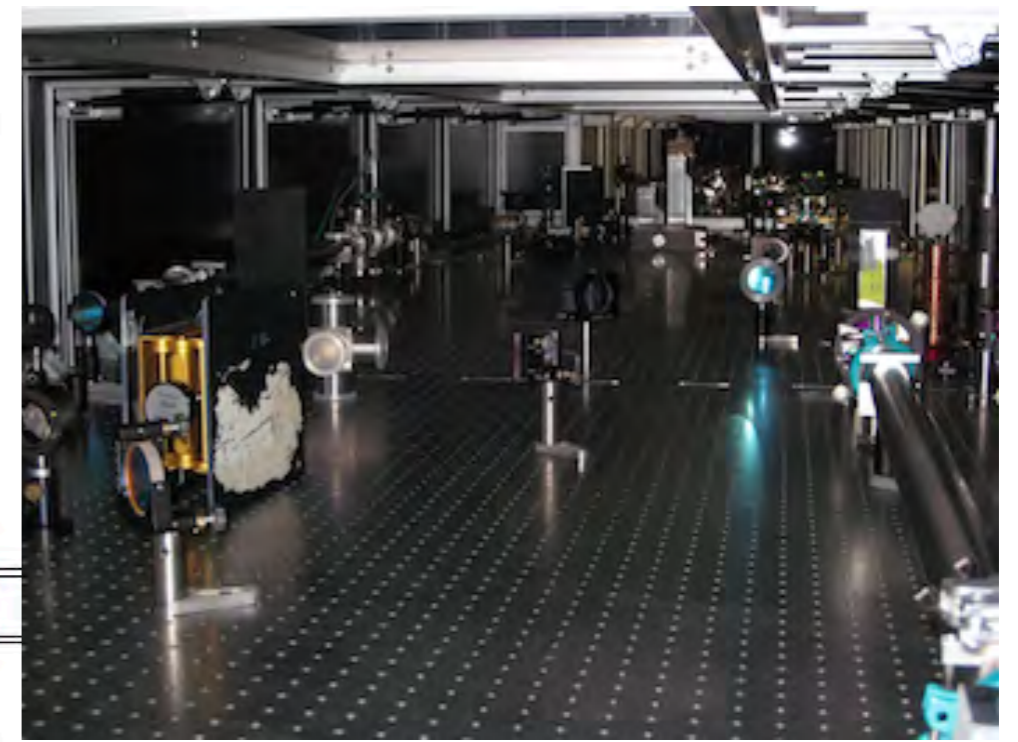
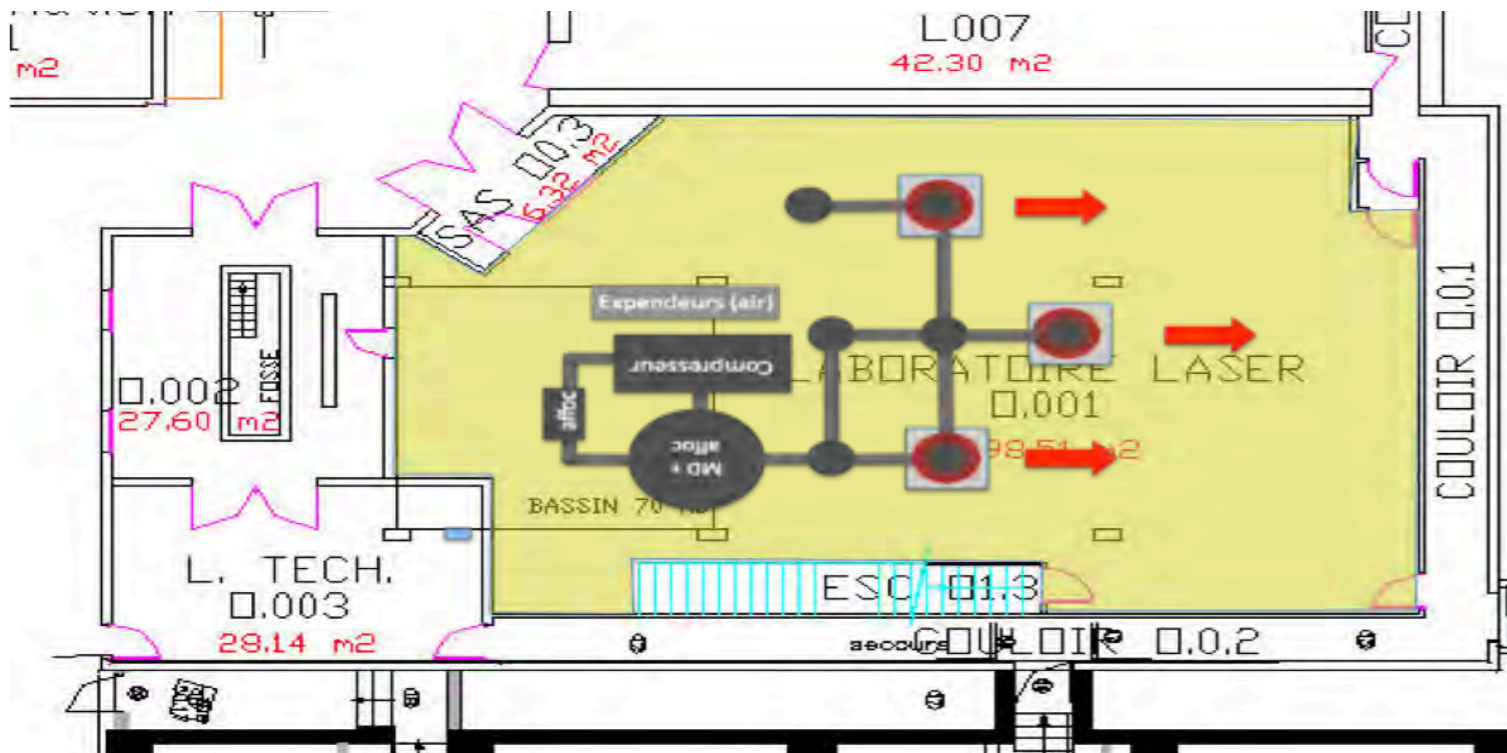
Laser 2 x 60 TW du LOA, partagé entre 3 thématiques

Responsabilité LOA



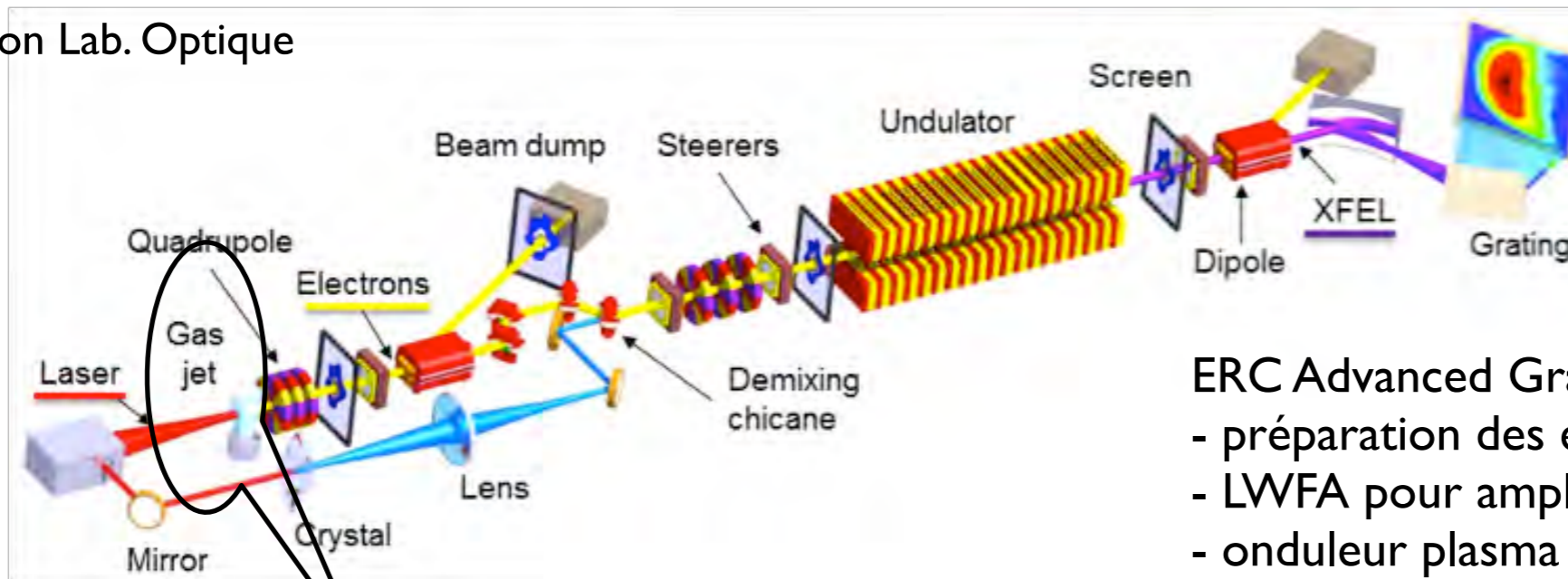
ERC Advanced Grant X- Five (V. Malka) :

- préparation des électrons LWFA
- LWFA pour amplification LEL
- onduleur plasma



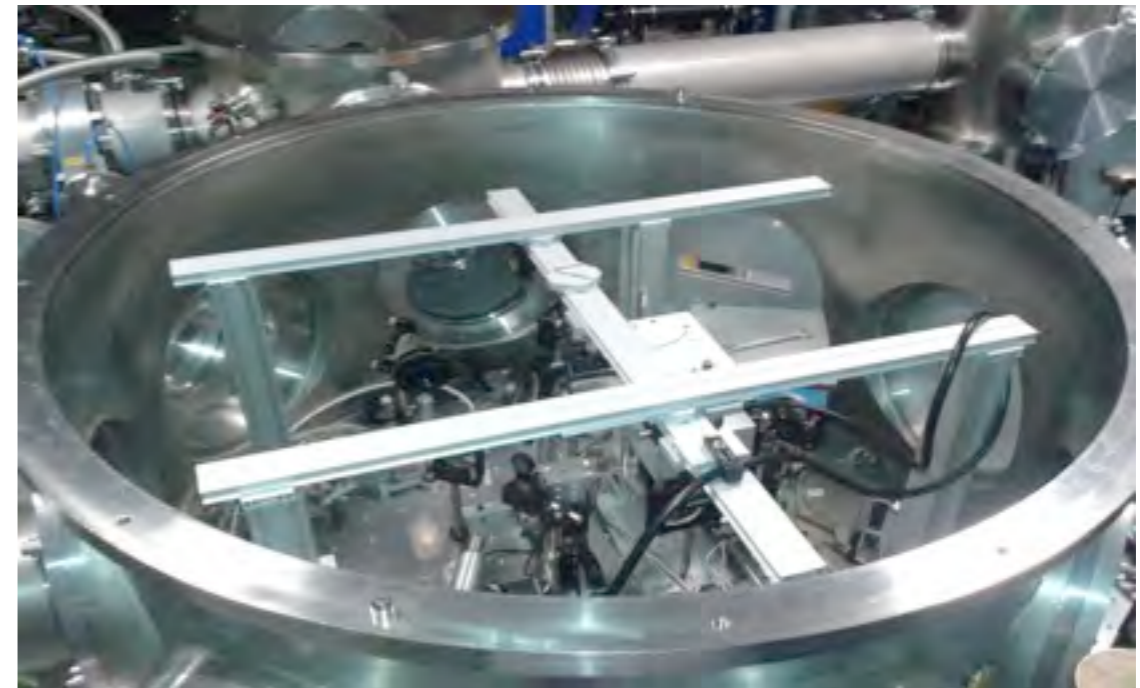
La source d'électrons

Collaboration Lab. Optique
Appliquée



ERC Advanced Grant X- Five (V. Malka) :

- préparation des électrons LWFA
- LWFA pour amplification LEL
- onduleur plasma

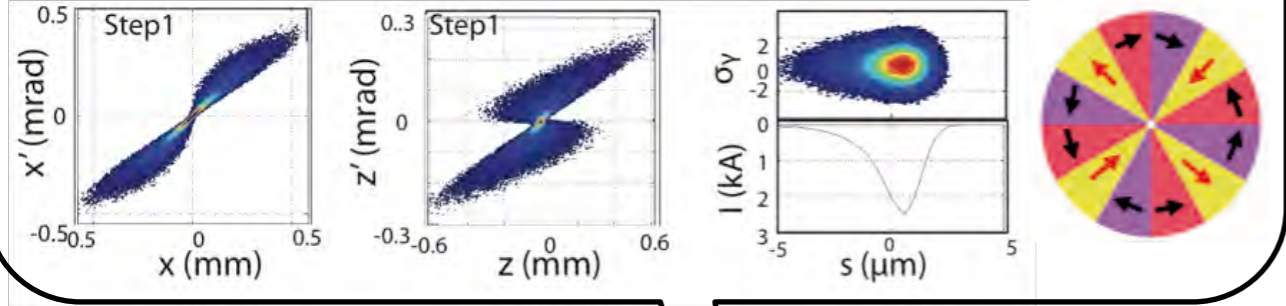


www.lunex5.com

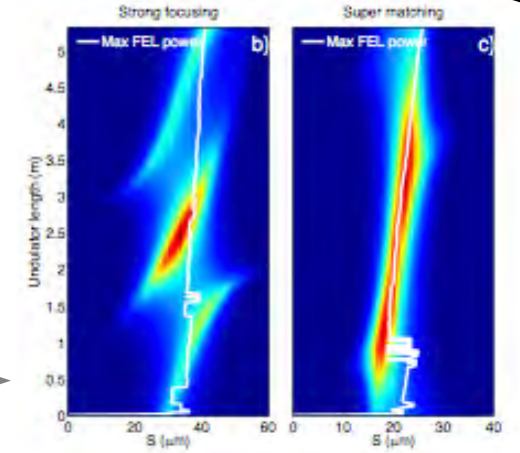
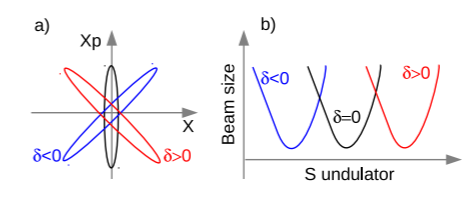
Vers une démonstration d'amplification avec un LWFA

strong focusing

start : 400 MeV, 1 μ m, 1.25 mrad, 1 %, 2 fs RMS, 20 pC

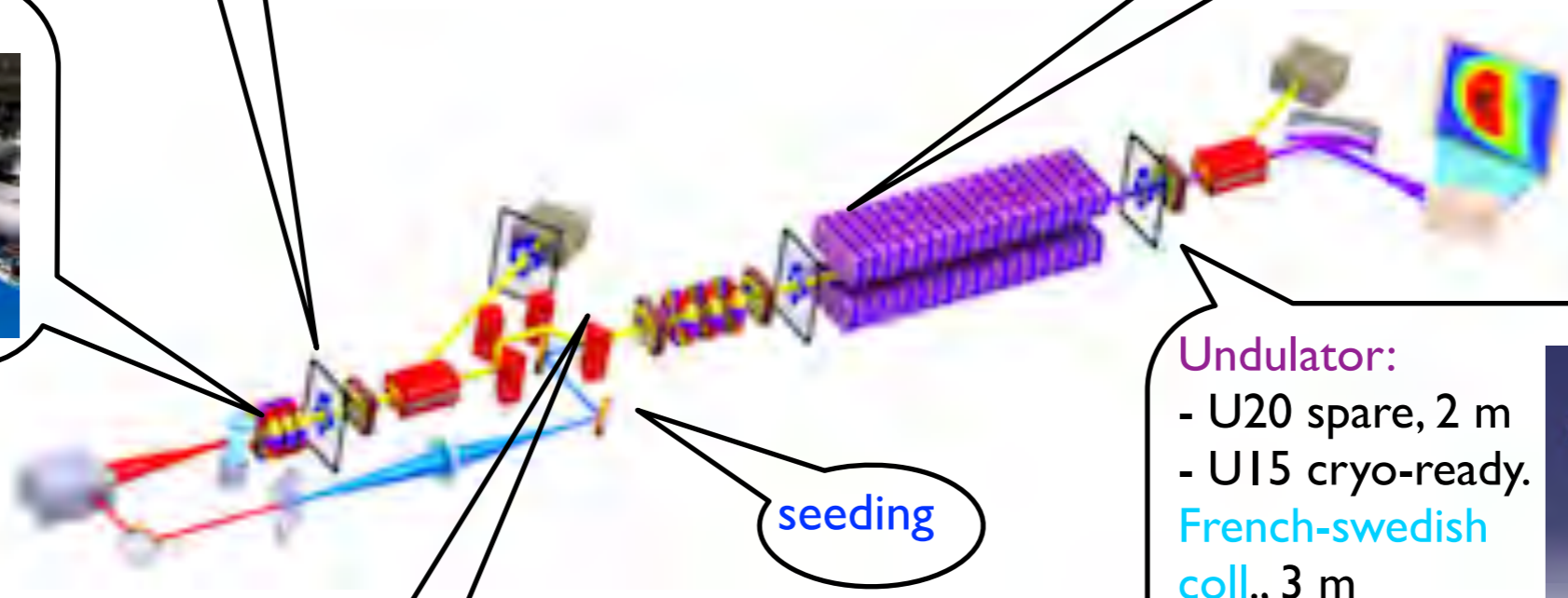


supermatching



A. Loulergue et al. sub. PRL

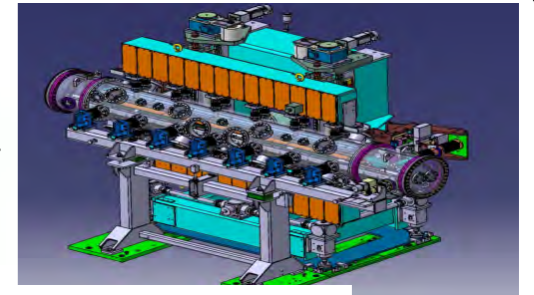
LWFA



seeding

Undulator:

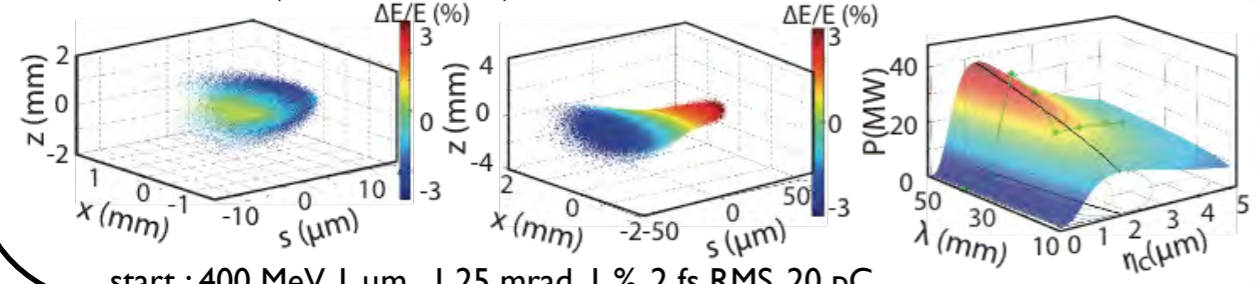
- U20 spare, 2 m
 - U15 cryo-ready.
- French-swedish coll., 3 m



decompression (1 % -> 0.1 %, 2 fs -> 20 fs)

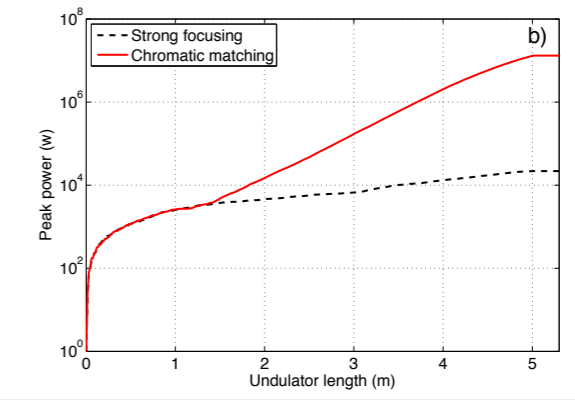
before the chicane (2.2 kA, 4 fs RMS)

after the chicane (180A, 40 fs RMS)



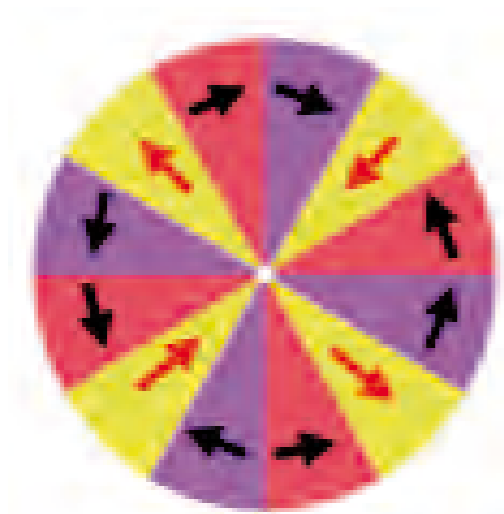
start : 400 MeV, 1 μ m, 1.25 mrad, 1 %, 2 fs RMS, 20 pC

A. R. Maier et al., Phys. Rev. X 2, 031019 (2012)



Les composants magnétiques du transport

Quadrupole variable à aimants permanents
projet QUAPEVA, Triangle de la Physique,
Valorisation
SOLEIL / Sigmaphi
200T/m



• Les diagnostics

diagnostics électrons :

stations de profil transverse avec écran OTR amovible
cavity BPM et stripline

diagnostics photon :

DIAGON

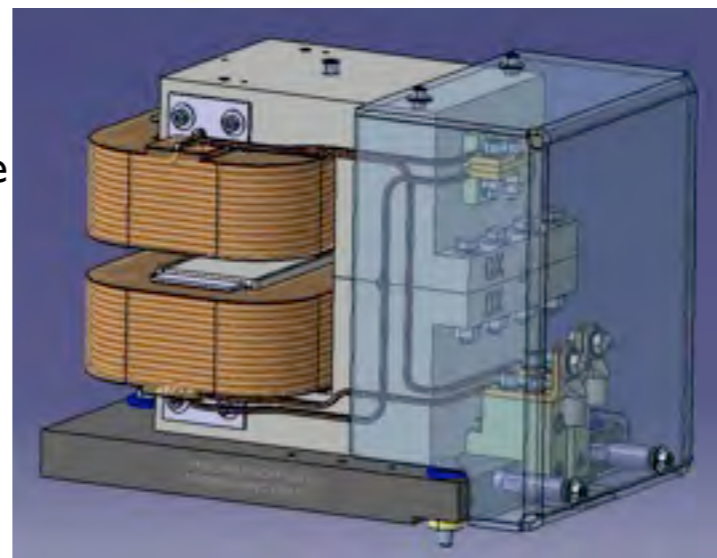
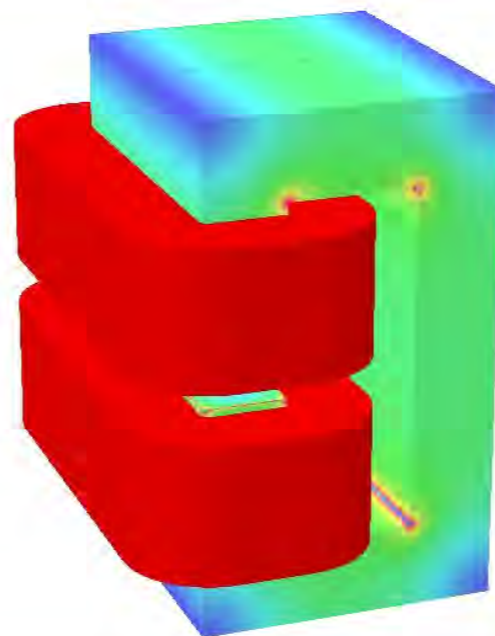
Hartmann sensor
monochromateur

Aimants de la chicane

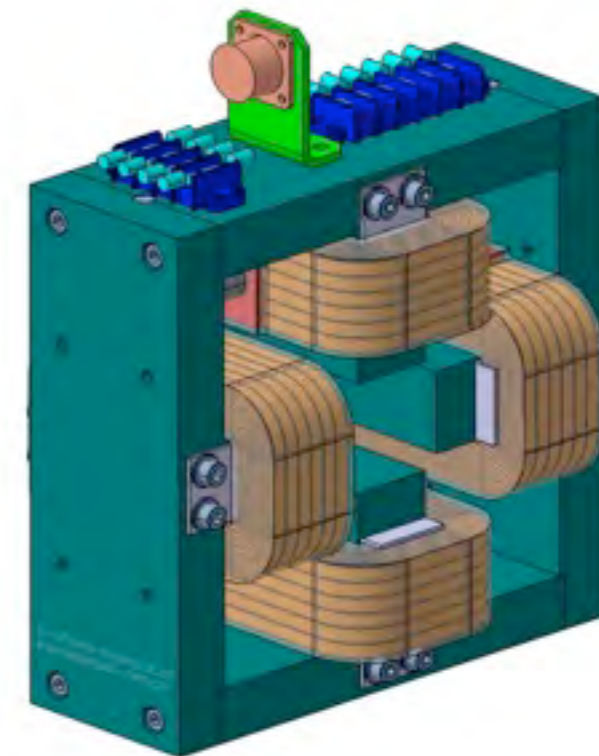
Conception : C. Benabderrahmane
et alimentations associées

- Champ magnétique $B = 0.537 \text{ T}$
- Intégral de champ $IB = 123 \text{ T.m}$
- Qualité du champ $\Delta B = 0.3\%$ à $\pm 20 \text{ mm}$

Dibôle déflecteur



Correcteurs



Conducteur : $5 \times 1.25 \text{ mm}^2$ plat
Bobine cuivre: $30 \times 15 \text{ mm}^2$
Bobine totale: $36 \times 20 \text{ mm}^2$
Nombre de tours $N = 72$
Densité du courant $D = 1.6 \text{ A/mm}^2$
Courant $I = 10 \text{ A}$
Tension $V = 3 \text{ V}$
 $I_{\text{max}} = 10 \text{ A}, J = 1.6 \text{ A/mm}^2$
 $B_{y_0} = B_{x_0} = 350 \text{ G}$
 $IB_y = IB_x = 31 \text{ G.m}$

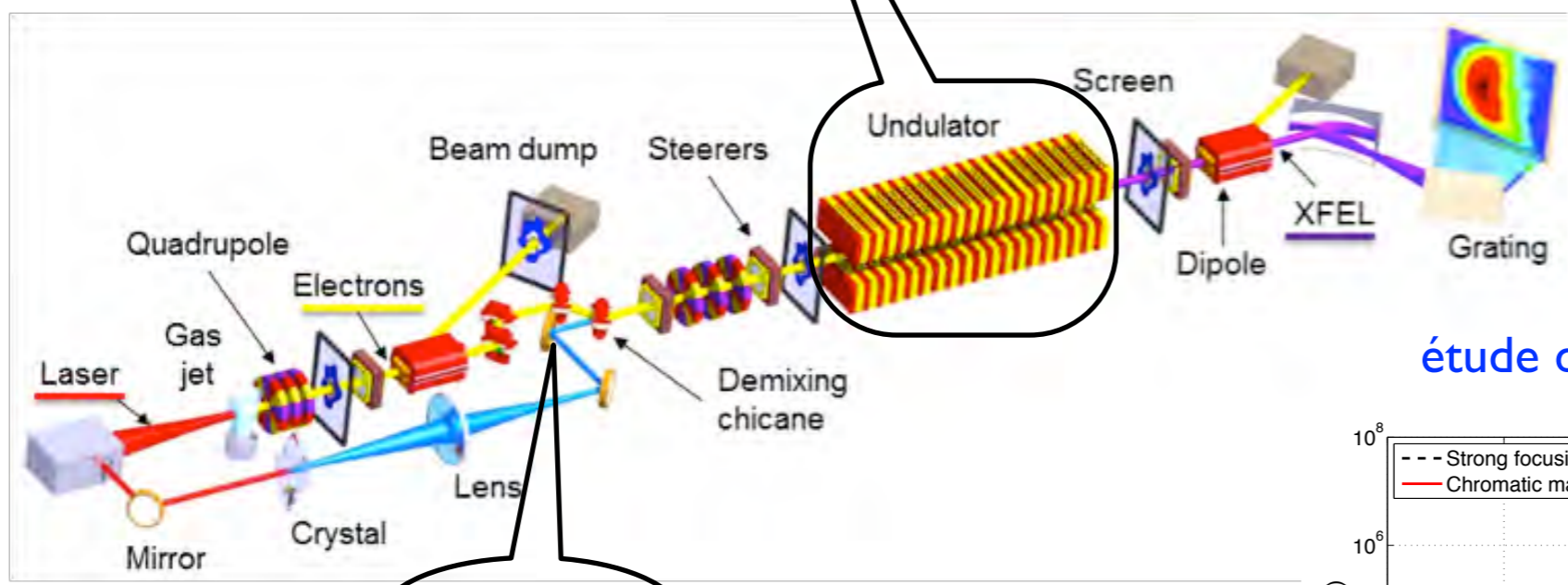
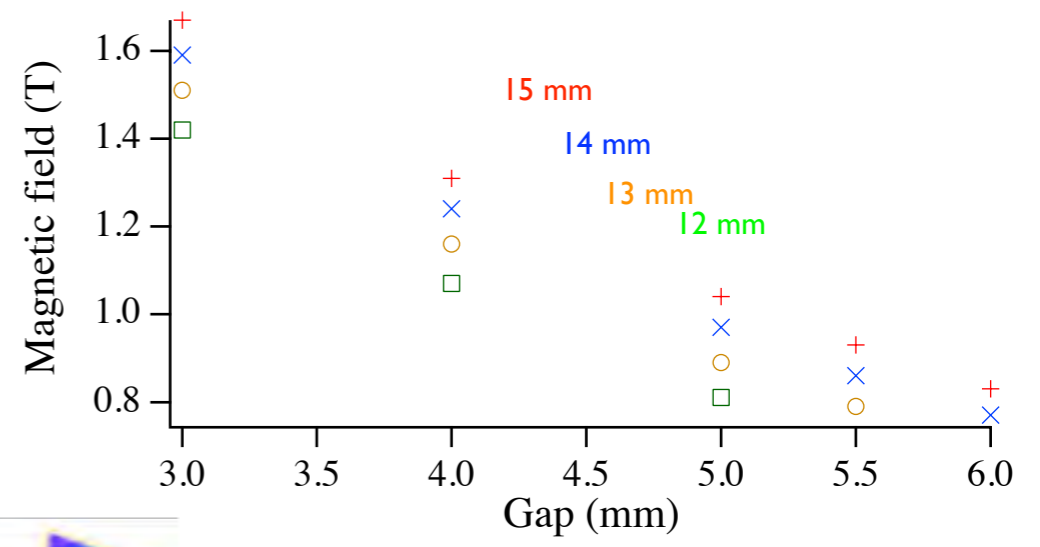
www.lunex5.com

électrons dans l'onduleur



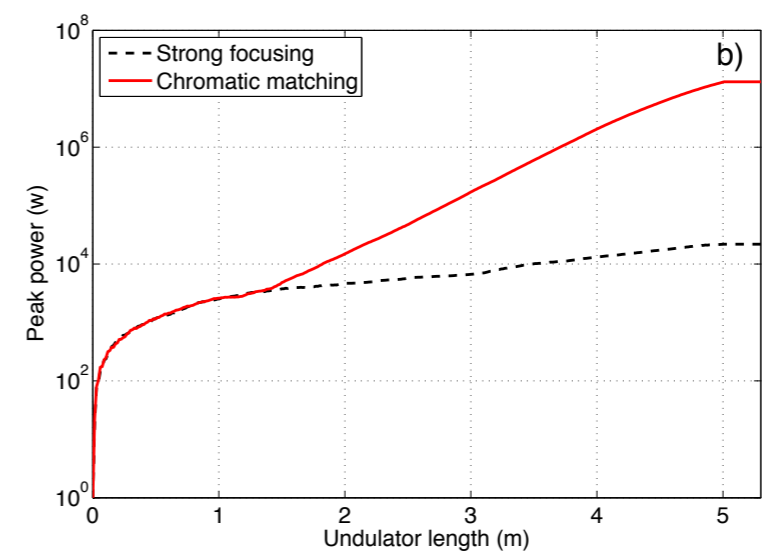
Onduleur:

- U20 spare, 2 m
- U15 cryo-ready coll. Suède, 3 m



seeding

étude de l'amplification



Cas U15, 5 m, 1.5 T, 40 nm

étude de l'émission spontanée

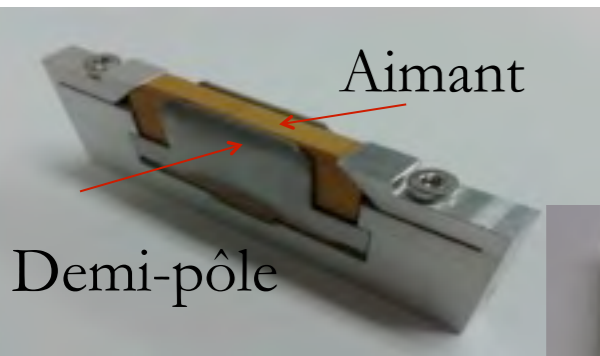
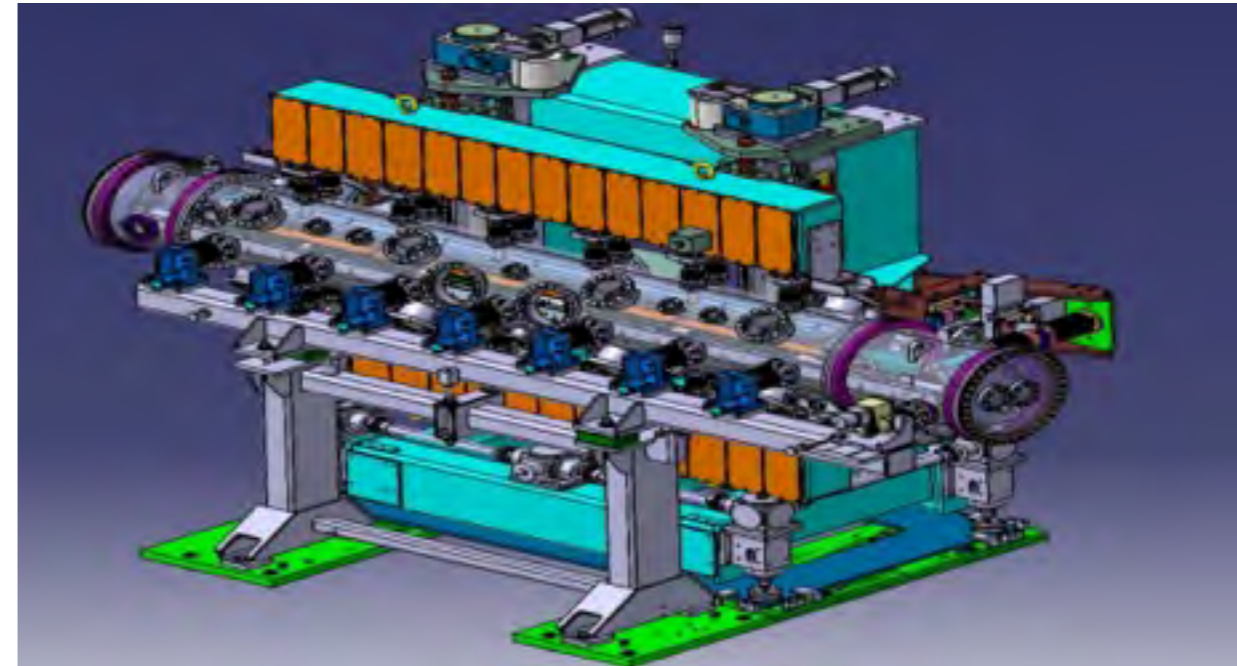
- analyse des spectres pour déterminer l'émittance, la dispersion en énergie
- analyse de la stabilité

R&D ondulateur cryogénique

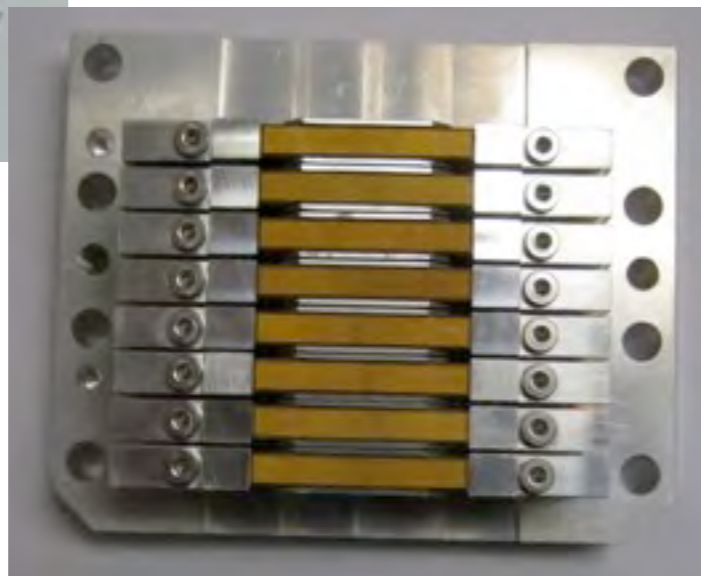
Développement R&D de l'ondulateur Cryo-Ready dans le cadre de la collaboration France-Suède

Choix de la nuance d'aimant permanent

Type d'aimant	$\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
Rémanence B_r	1.30 T
Coercivité H_{cj}	1671 kA/m



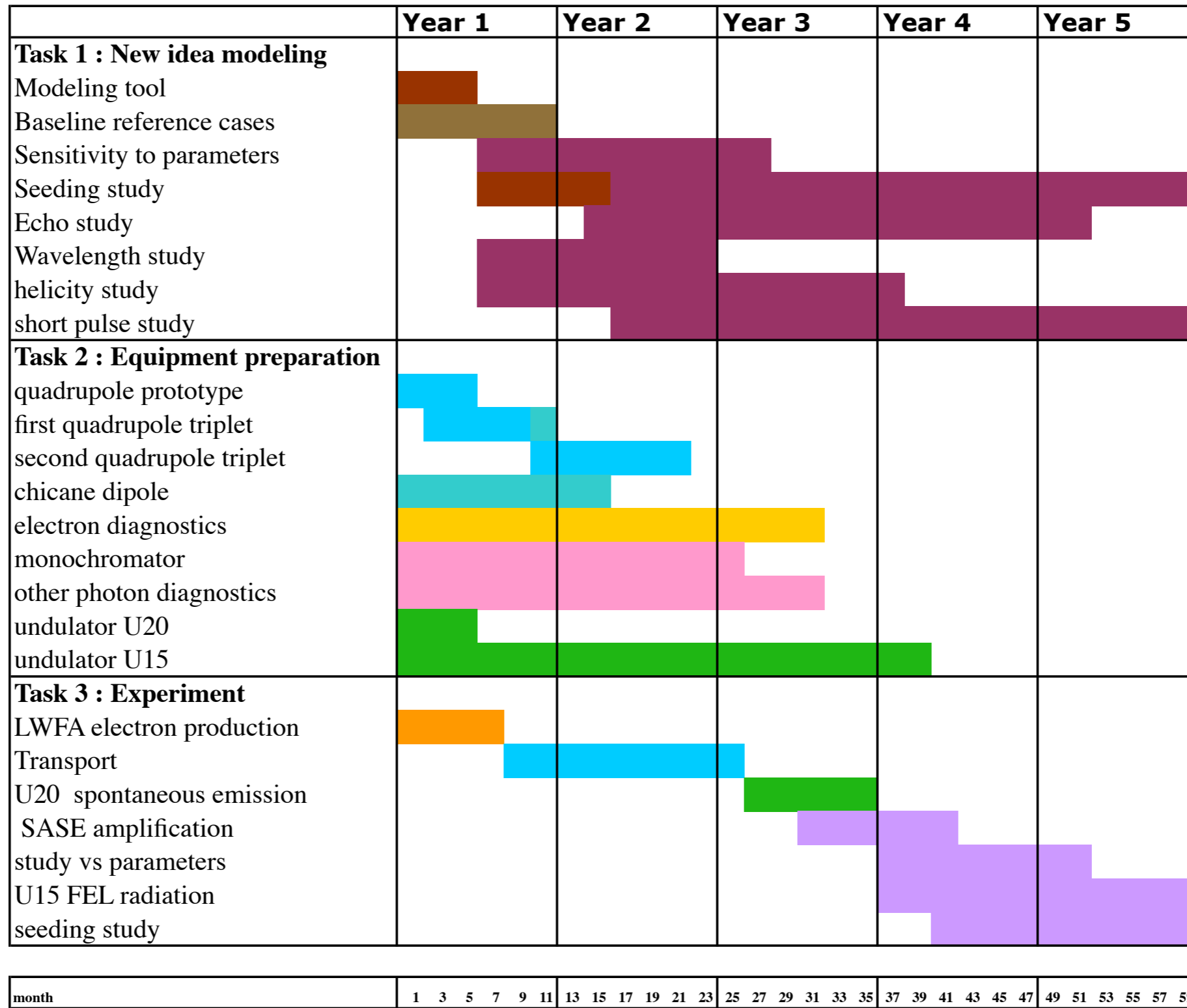
Modification des modules d'aimants



	U20	U15
Technologie	Sous vide	Cryo-Ready
Type	Hybride	Hybride
PM	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	$\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
Pole	VP	VP
Période:	20 mm	15 mm
Périodes:	98	200
B_{z_0} :	1.05 T à 293 K	1.67 T à 77 K
K:	1.961	2.339
Entrefer min:	5.5 mm	3 mm

Tâches et planning

COXINEL schedule



Vers des impulsions ultra-courtes

Étudier le schéma le plus adapté à LUNEX5 vers les impulsions plus courtes que 10-20 fs

I. Martin, R. Bartolini, PRSTAB 14, 030702 (2011)

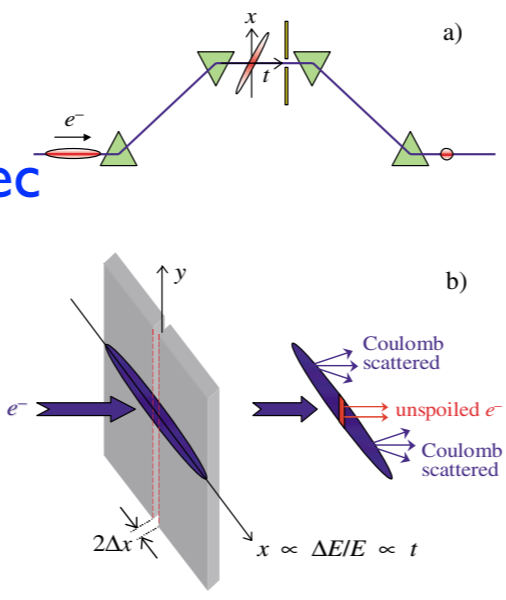
Emittance spoiler

P. Emma, PRL 92 (7), 074801 (2004)

rayonnement d'un faisceau d'électron avec chirp en énergie

- utilisé comme seed du second étage
C. Schroeder et al., NIMA 483, 89 (2002)

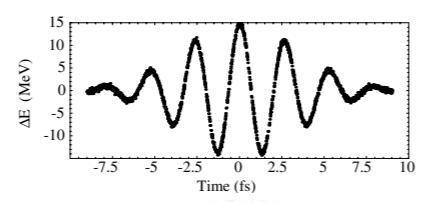
- post-compression optique
C. Pellegrini, NIMA 445, 124 (2000)



modulation d'énergie d'électrons : trajectoire dans une petite partie du paquet avec qq cycles laser

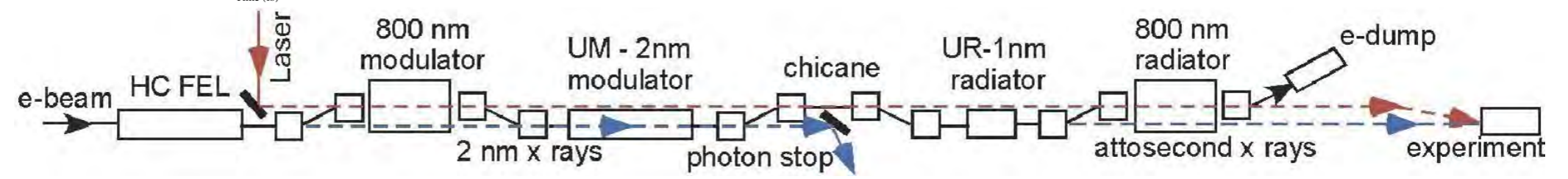
A.A. Zholents, PRSTAB 8, 040701 (2005); A.A. Zholents, G. Penn. PRSTAB 8, 050704 (2005), A. Zholents et al., New J. Physics 10, 025005 (2008)

Few cycle laser
1 mJ, 5 fs



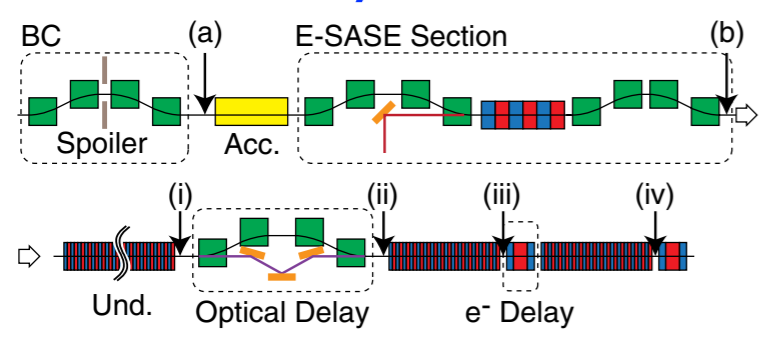
selective amplification

100 MW; 100 fs
X-ray



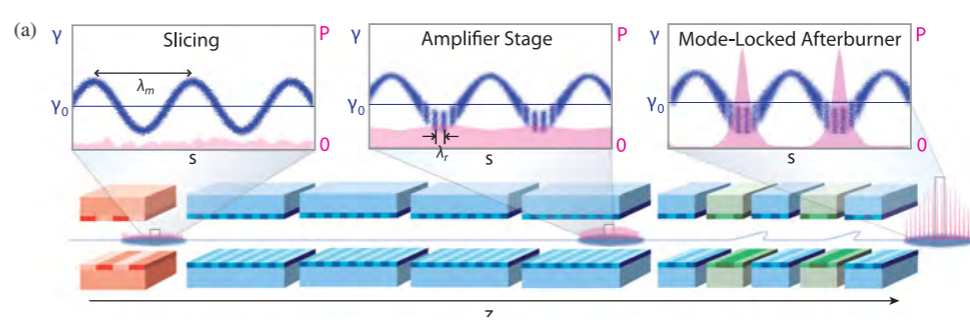
A.A. Zholents, W. Fawley. PRL 92 (22), 224801 (2004), E. Saldin et al., Opt. Comm. 239, 161 (2004), E. Saldin et al., PRSTAB9, 050702 (2006)

as multiTW X ray : slotted foil+ eSASE



T. Tanaka PRL 110, 084801 (2013)

few cycles X-ray FEL



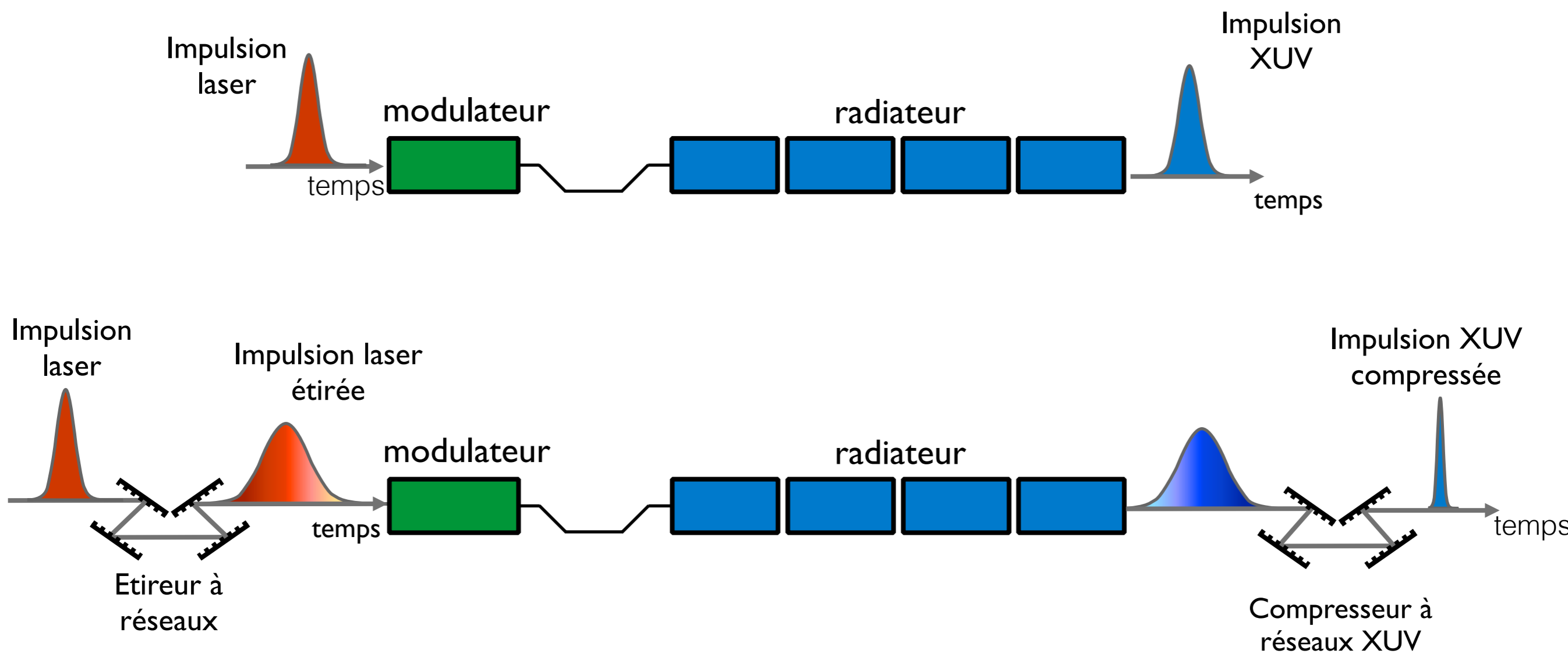
D. J. Dunning et al. PRL 110, 104801 (2013)

Vers des impulsions ultra-courtes

Étudier le schéma le plus adapté à LUNEX5 vers les impulsions plus courtes que 10-20 fs :
ex. de post-compression d'impulsions

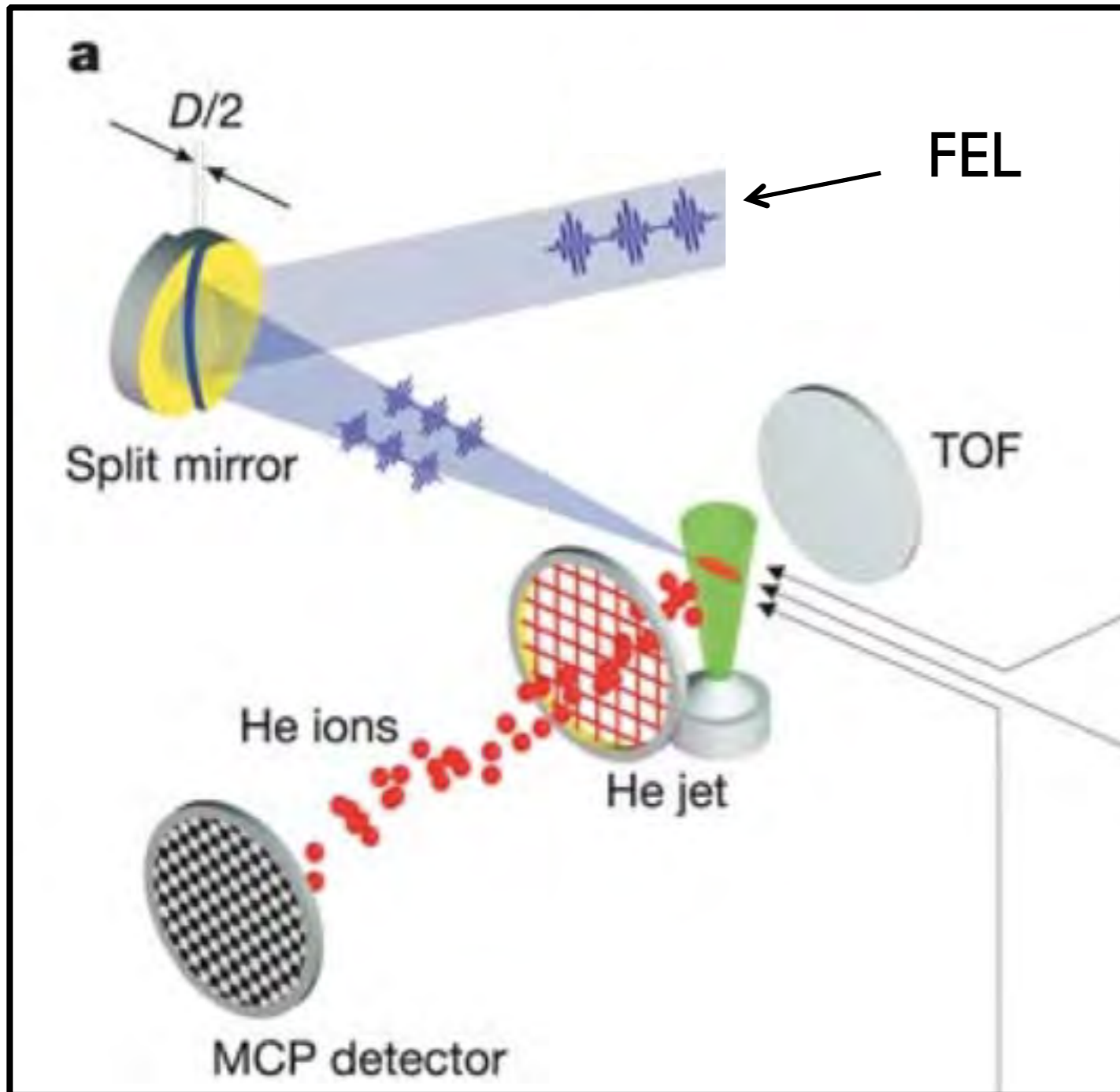
Proposal FELShaping, PALM

Proposal OPT2X, OPTimizing OPTical pulses for XUV ultrafast science, D. Doweck, ISMO, IDEX



Vers des impulsions ultra-courtes

Métrologie d'impulsions XUV fs voire attoseconde



Autocorrélation du 2nd ordre par double ionisation de l'hélium

Signal d'ions



Estimation de la durée de l'impulsion XUV

Sur HHG *Tzallas et al., Nature 426, 267-271 (2003)*

Sur FEL *Mitzner et al., Phys. Rev.A 80, 025402 (2009)*

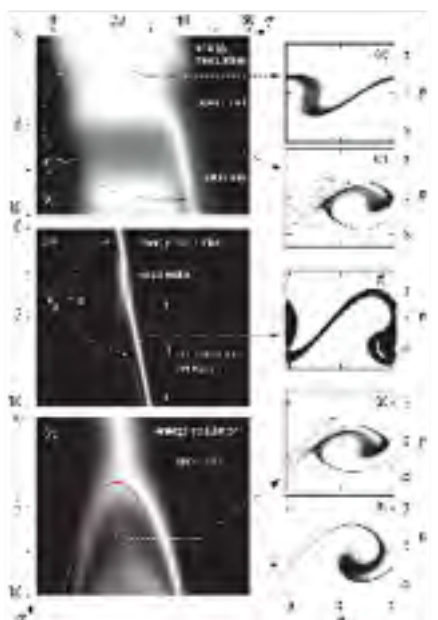
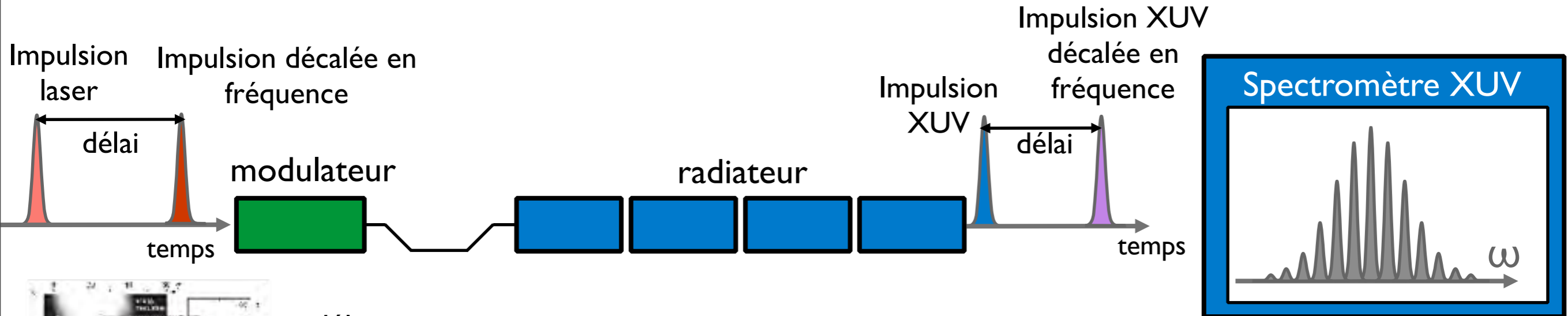
Vers des impulsions ultra-courtes

Méetrologie d'impulsions XUV fs voire attoseconde

Interférométrie spectrale (SPIDER)

SPIDER : Spectral Interferometry for direct electric field reconstruction of ultra-short optical pulses

Seed



délai avec seeding :
 2 impulsions linac successives mode pulse splitting

M. Labat, et al. Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 264801

Avec des impulsions laser *Iaconis and Walmsley, Opt. Lett., 23, 792-794 (1998)*
 Sur HHG *Mairesse et al., Phys. Rev. Lett., 94, 173903 (2005)*

Mesure de l'impulsion XUV en un seul tir

Conclusion et perspectives

Les sources LEL X actuelles offrent de nouvelles possibilités pour la communauté d'utilisateurs. Elle cherchent à mettre en œuvre de nouvelles possibilités pour élargir la gamme de performances (deux couleurs, impulsions courtes) tout en renforçant la fiabilité.

Le démonstrateur LUNEX5 vise à étudier des schémas de LEL avancées tout en préparant la R&D requise pour répondre aux besoins de la communauté scientifique et à tester de nouveaux schémas d'accélération pour une application laser à électrons libres.

Le projet est encore très flexible, ouvert aux collaborations.

Une partie de la R&D et des études sont lancées.

Il reste encore des études à mener et une autre partie de la R&D à lancer.

- structure temporelle haute cadence
- canon
- cellule RF élémentaire en mode CW
- synchronisation
- kickeur à haute cadence pour une installation multi-LEL
- diagnostic photon femtoseconde

www.lunex5.com

à :

Review committee

ASSMAN Ralph (CERN)
 BARTOLINI Riccardo (Diamond, UK)
 FELDHAUS Josef (DESY, Germany)
 GEORGES Patrick (Institut
 d'Optique, France)
 RUBENSSON Jan-Erik (Uppsala,
 Sweden)
 SCHROEDER Carl (Lawrence
 Berkeley Laboratory, Berkeley, USA)

Steering Committee

AMIRANOFF François (CILEX)
 BIELAWSKI Serge (PHLAM)
 CARRÉ Bertrand (CEA-SPAM)
 CAVALIER Fabien (LAL, P2IO)
 COUPRIE Marie- Emmanuelle
 (SOLEIL)
 DAILLANT Jean (SOLEIL)
 DUBOIS Alain (LCPMR)
 FARVACQUE Laurent (European
 Synchrotron Radiation Facility)
 LOULERGUE Alexandre (SOLEIL)
 MARSI Marino (PALM),
 MORIN Paul (SOLEIL)
 NADJI Amor (SOLEIL)
 STOCCHI Achille (LAL/ P2IO)
 ROUSSE Antoine (LOA)

SOLEIL Council members

GIRARD Bertrand (CNRS)
 SIMON Charles (CNRS)
 DURAUD Jean-Paul (CEA)

LUNEX5 team

Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers – Saint Aubin – BP48- F-91192 Gif-sur-Yvette CEDEX

General Direction: DAILLANT Jean (General Director of SOLEIL)
 Communication Group: GACOIN Marie-Pauline, QUINKAL Isabelle, YAO
 Stéphanie
 Partnerships : CAMINADE Jean-Pierre
 Planification, Methods, Quality : ROZELOT Hélène
 Security Group : LAURENT Jean-Pierre, PRUVOST Jean-Baptiste

Sources and Accelerator Division : NADJI Amor, PODGORNY Sabine
 Accelerator Physics Group : NAGAOKA Ryutaro, LOULERGUE
 Alexandre
 Diagnostics Group: DENARD Jean-Claude, CASSINARI Lodovico, EL
 AJJOURI Moussa, HUBERT Nicolas, LABAT Marie, RICAUD Jean-Paul
 Magnetism and Insertion devices Group: BOURASSIN-BOUCHET
 Charles, COUPRIE Marie-Emmanuelle, BENABDERRAHMANE
 Chamseddine, EVAÏN Clément, MARTEAU Fabrice, TANIKAWA
 Takanori, VALLEAU Mathieu
 Power Supplies Group : LEBASQUE Pierre, BOUVET François
 RF and LINAC Group: MARCHAND Patrick, EL AJJOURI Moussa,
 LOPES Robert, LOUVET Marc, POLLINA Jean- Pierre, RIBEIRO
 Fernand

Experimental Division: MORIN Paul
 Optics Group: LAGARDE Bruno, POLACK François
 Instrumentation group : HOLLANDER Philippe
 PLEIADES Beamline: MIRON Catalin
 METROLOGY Beamline : MERCÈRE Pascal
 AILES Beamline : ROY Pascale
 CRISTAL : RAVY Sylvain, LAULHE Claire
 TEMPO : SIROTTI Fausto, LÛNING Jan

Technical and development Division: BESSIERE Michel
 Alignment Group: LESTRADE Alain
 Building and infrastructures Group: EYMARD Philippe, FERRARI
 François
 Conception Engineering Group: MARLATS Jean-Louis
 Vacuum Group: HERBEAUX Christian

Computing Division; GAGEY Brigitte (Director of the Computing
 Division)

Acquisition and Control Electronics Group: BETINELLI Pascale,

Administrative Division : LE Ray Yves, S. Sancerni, M. Nigen, M. Leroy,
 I. Ly Ky Juridics and Procurements : LEROY Michael

Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives /Saclay 91191 Gif-sur-Yvette CEDEX

CEA, Direction des Sciences de la Matière, SM/ IRAMIS/ Service de
 Photons Atomes et Moécules: CARRE Bertrand, D' OLIVEIRA Pascal,
 GARZELLA David, MONOT Pascal, POISSON Lionel REYNAUD Cécile

CEA, Direction des Sciences de la Matière / IRFU/ Service des
 Accélérateurs, de la Cryogénie et du Magnétisme: DAËL Antoine, BREDY
 Philippe, DEVANZ Guillaume, LUONG Michel, MOSNIER Alban, NAPOLY
 Olivier,

CEA, Direction des Sciences du Vivant DSV, LBSR : LE DU Marie-Hélène

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL), Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris-Sud
 VARIOLA Alessandro, BRUNI Christelle, ROUX Raphaël

Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), ENSTA, CNRS et École Polytechnique
 LAMBERT Guillaume, LEHE Rémi, MALKA Victor,
 ROUSSE Antoine, LIFSCHITZ Augustin, THAURY Cédric

Laboratoire de Physique des Lasers Atomes et Molécules (PhLAM) et Université de Lille

BIELAWSKI Serge, SZWAJ Christophe, EVAÏN Clément,
 LEPARQUIER Marc (Centre d' Études Lasers et Applications),
 ROUSSEL Eléonore

Laboratoire de Chimie Physique - Matière et Rayonnement (LCPMR)- 11 Rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris Cedex 05
 DUBOIS Alain, PENENT Francis, LÛNING Jan, PIANCASTELLI Maria
 Novella, SIMON Marc

Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO), Université Paris-Sud
 DOWEK Danièle

European Synchrotron Radiation Facility
 LE BEC Gaël , REVOL Jean-Luc

Fusion for Energy, ITER Department, c/Josep Pla 2- Torres Diagonal Litoral, Ed. B3, 08019 Barcelona, SPAIN
 FILHOL Jean-Marc