Accélérateurs
(basée sur la présentation Giens 2012)

Journée Irfu de préparation à ESG-Cracovie, 4 septembre 2012

Plan de l'exposé

Collisionneurs protons-protons

- LHC
- HL-LHC
- HE-LHC

Collisionneurs e+e-

- LEP3, super Tristan
- ILC
- CLIC

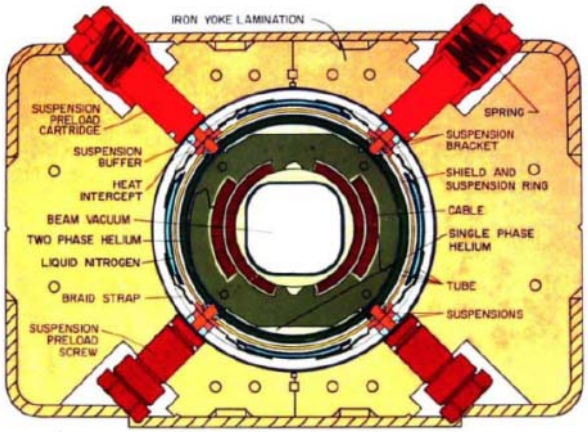
Collisionneurs e-p

- LHeC

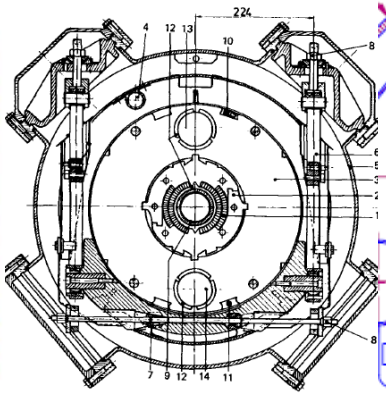
Accélération Laser-Plasma

Collisionneurs hadroniques

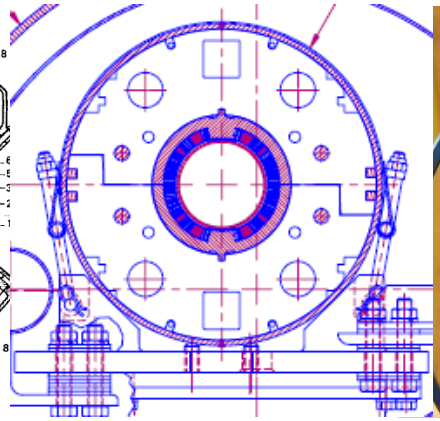
TEVATRON



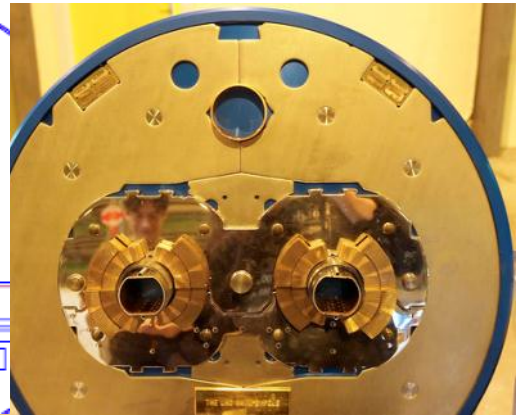
HERA

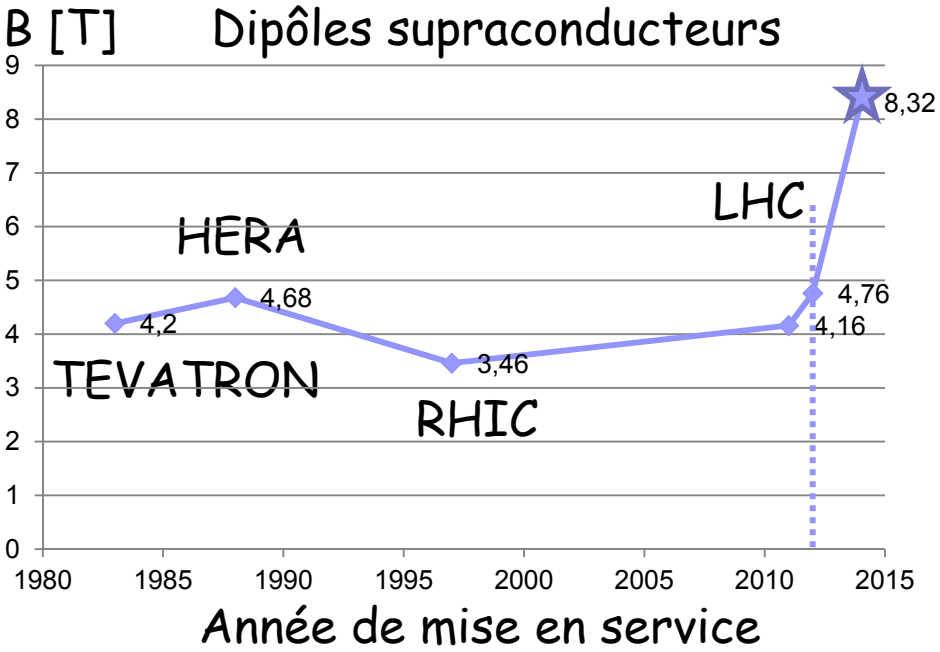


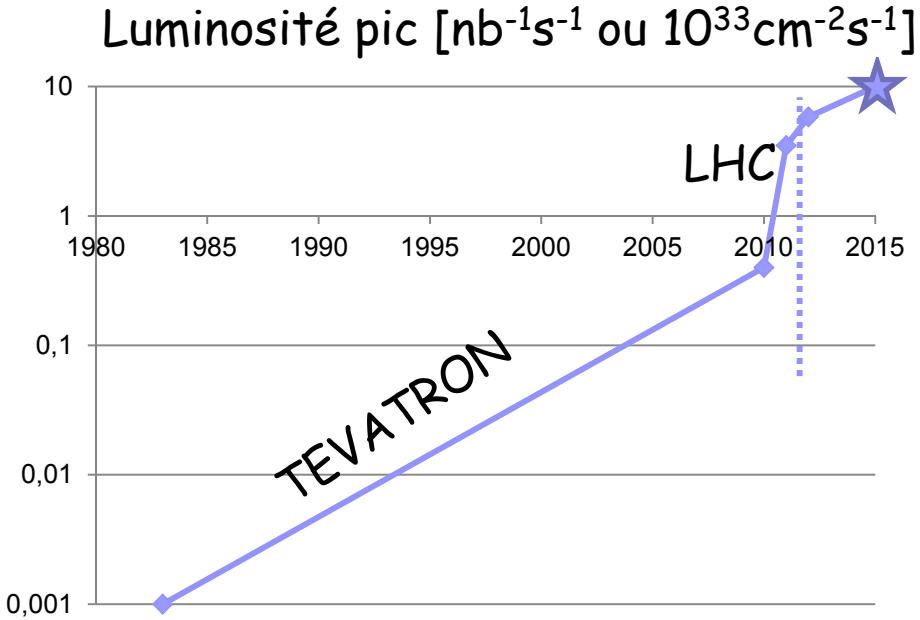
RHIC



LHC

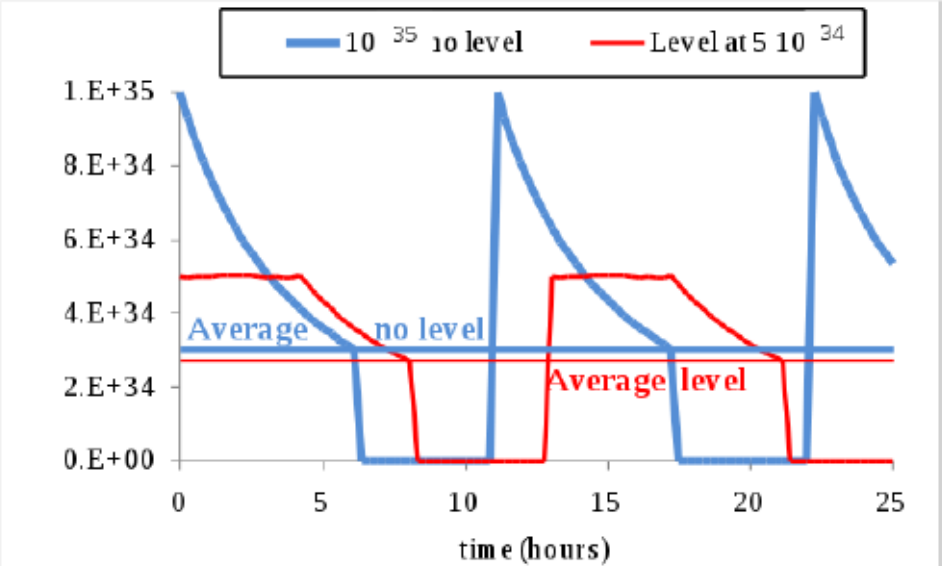






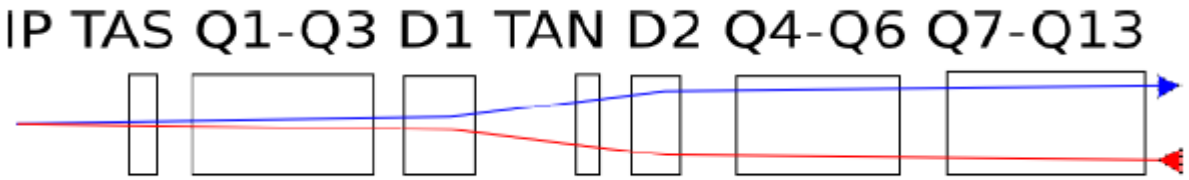
High Luminosity-LHC

"The HL-LHC study combines all work related to the provision of a peak luminosity of five times the design luminosity of the LHC (i.e. $5 \cdot 10^{34}\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ and with an enhanced luminosity lifetime by luminosity leveling".



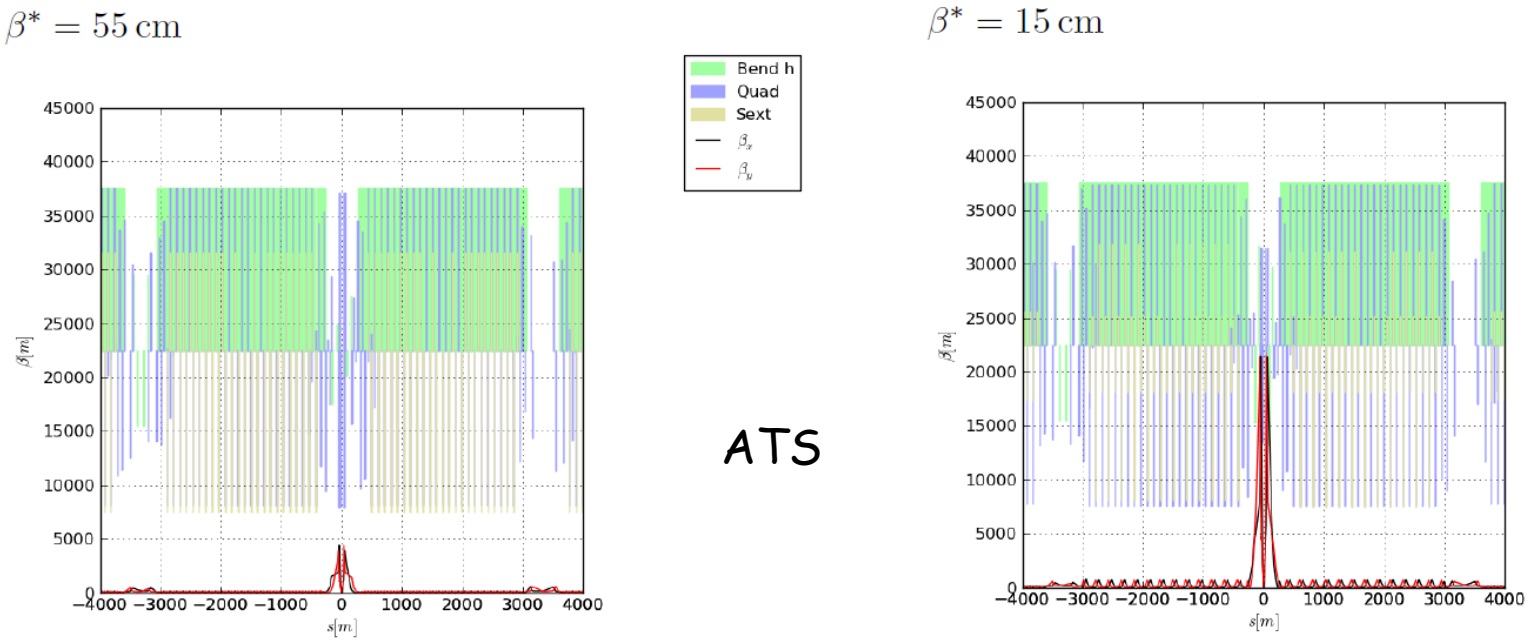
Luminosity leveling: change dynamically one beam parameter to compensate the natural luminosity decay starting the fill with a lower but, virtually possible, peak luminosity.

An integrated luminosity of $200 - 300\,\mathrm{fb}^{-1}$ per year and $3000\,\mathrm{fb}^{-1}$ by 2030 would be in reach.



Changement des Triplets en 2017 pour 1) tenue au radiation 2) $\beta^* = 15$ cm

High Luminosity-LHC : Dynamique fso



Le schéma 'Achromatic Telescopic Squeezing' (S. Fartoukh) qui prépare le faisceau dans les arcs une focalisation plus forte à l'IP, est le schéma de référence, testé avec succès sur le LHC à l'été 2011.

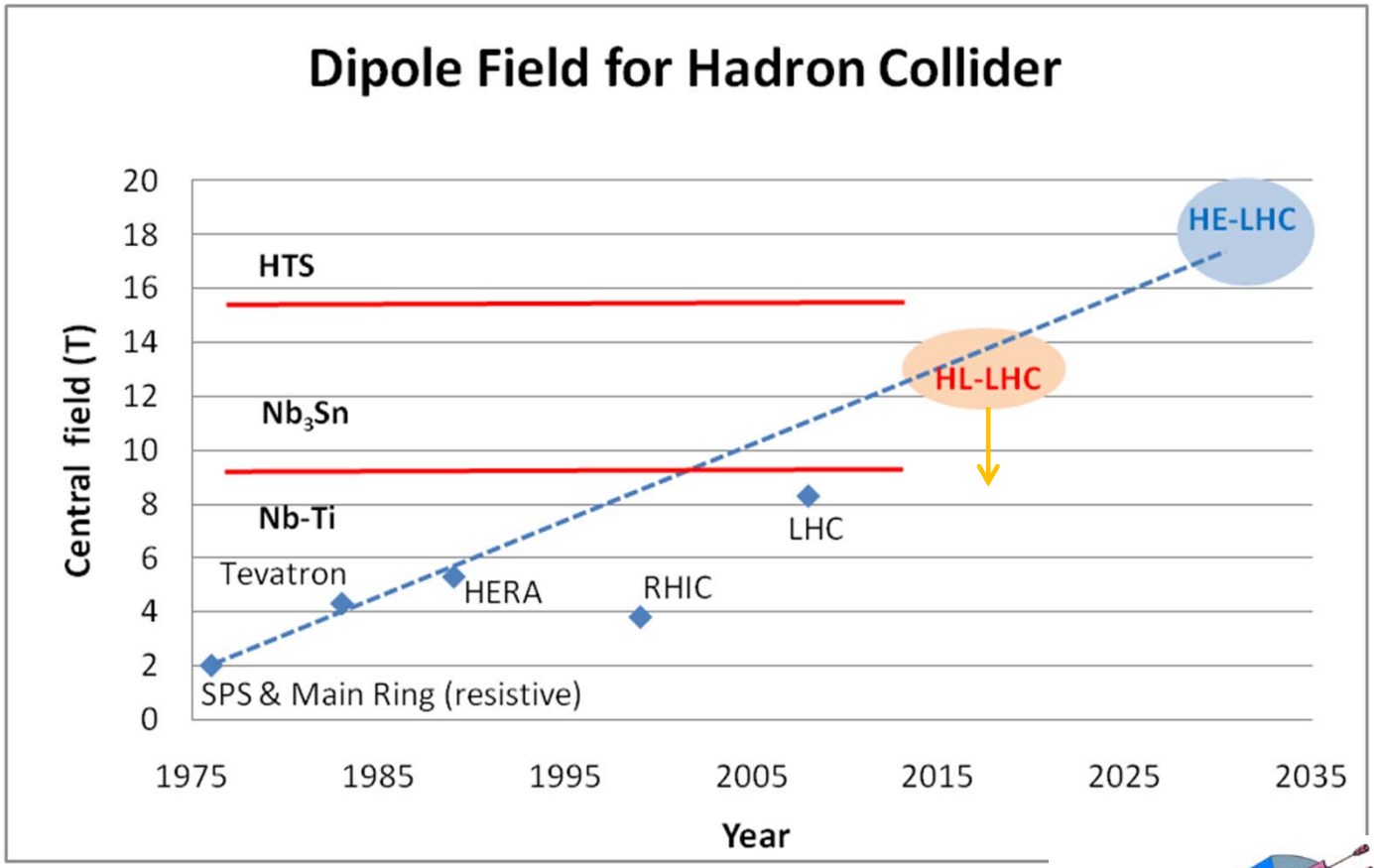
Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

- **Dynamique faisceau, optique de la région d'interaction**

Financement via FP7 HiLumi DS

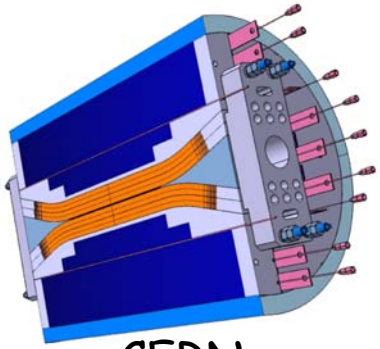
High Luminosity-LHC: Aimants

Material	T_C (K)
Nb	9.2
NbTi	9.5
Nb_3Sn	18.3
HTS	> 30



Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

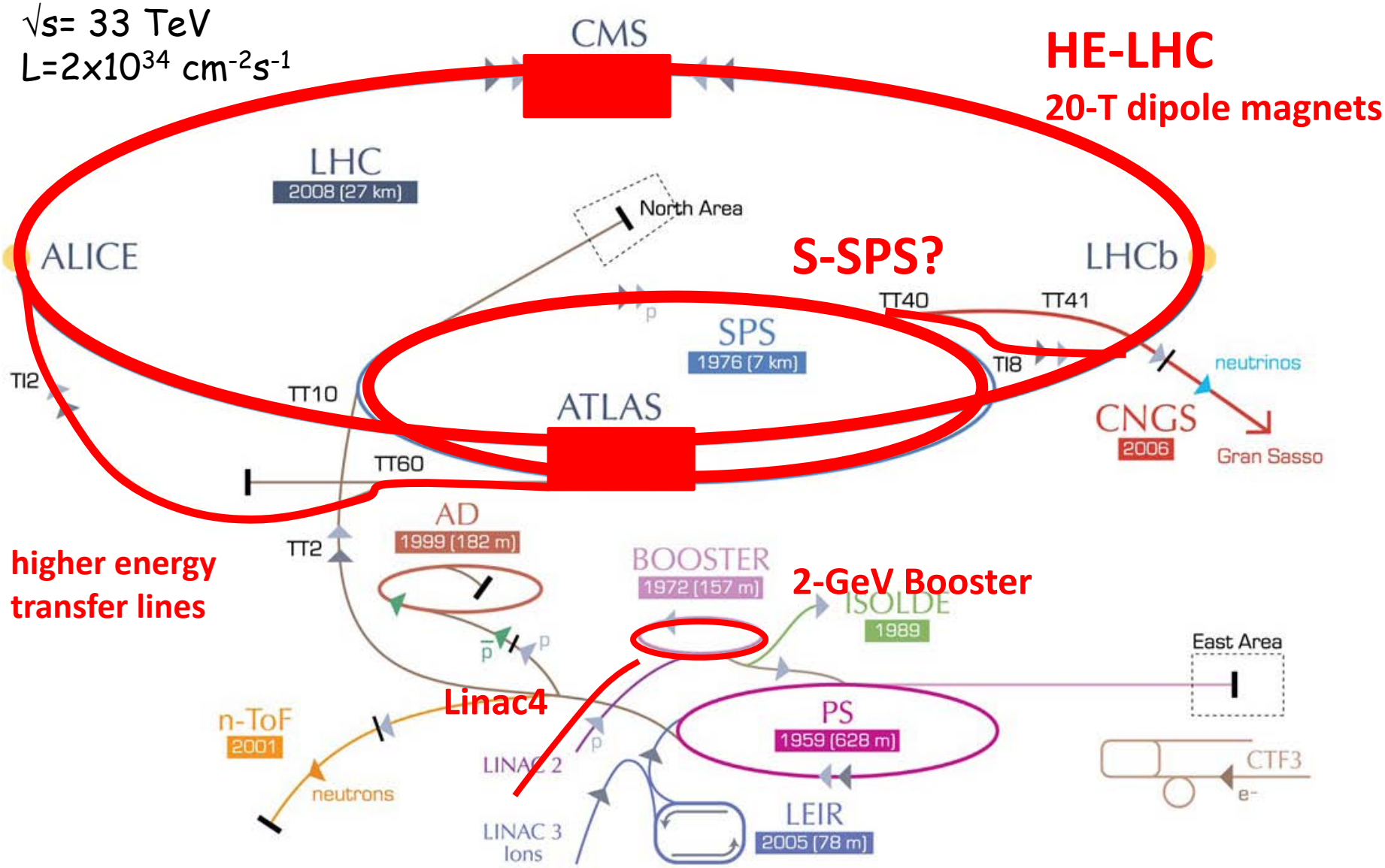
- Quadripôles NbTi 8,5 T à Φ120 mm
- Technologie aimants accélérateur en Nb3Sn



Financement via FP7 S-LHC CNI, HiLumi DS, EuCARD, Contr. France au CERN

High Energy-LHC

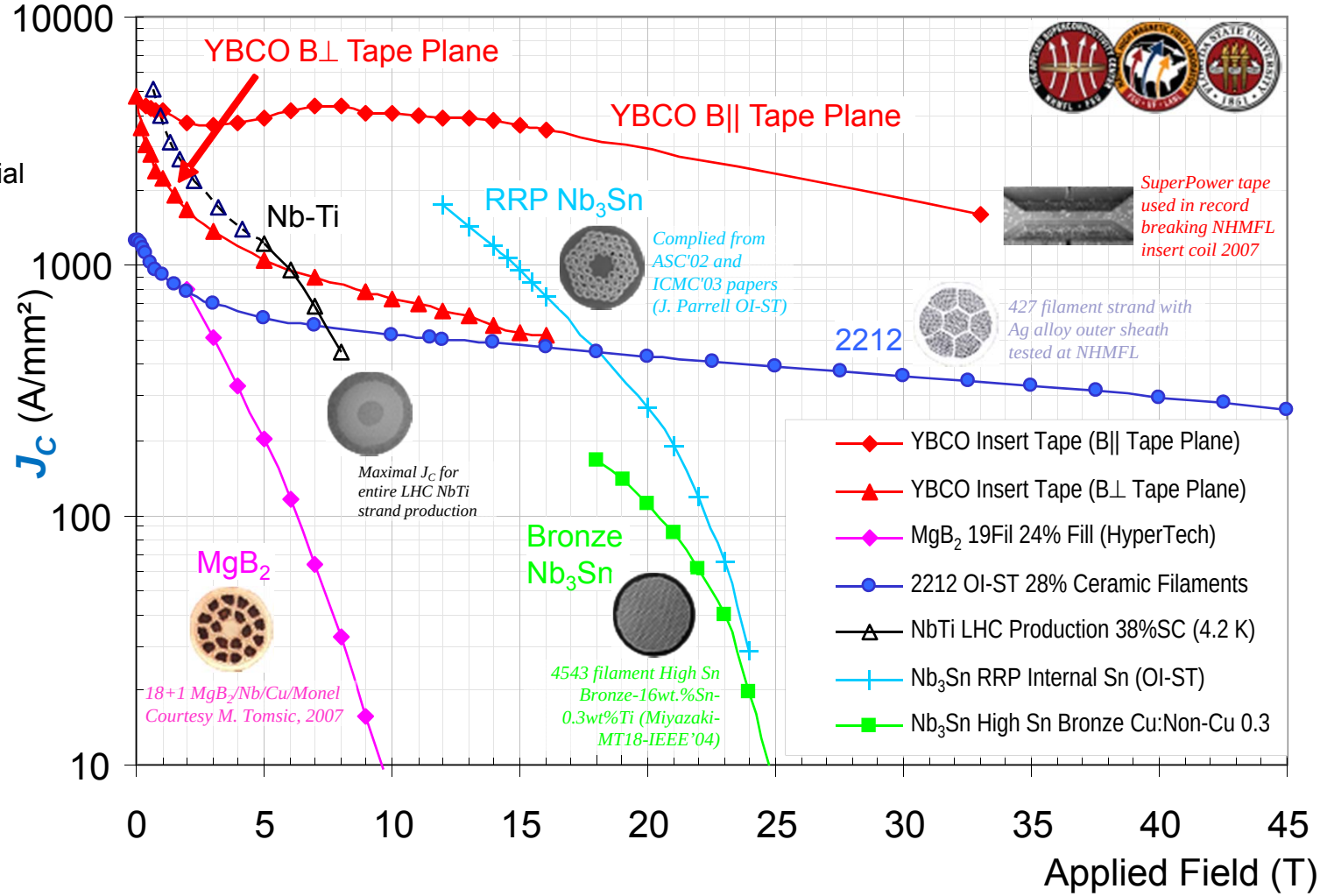
$\sqrt{s}$= 33 TeV
L=2x10^{34} cm^{-2}s^{-1}



High Luminosity-LHC

Material

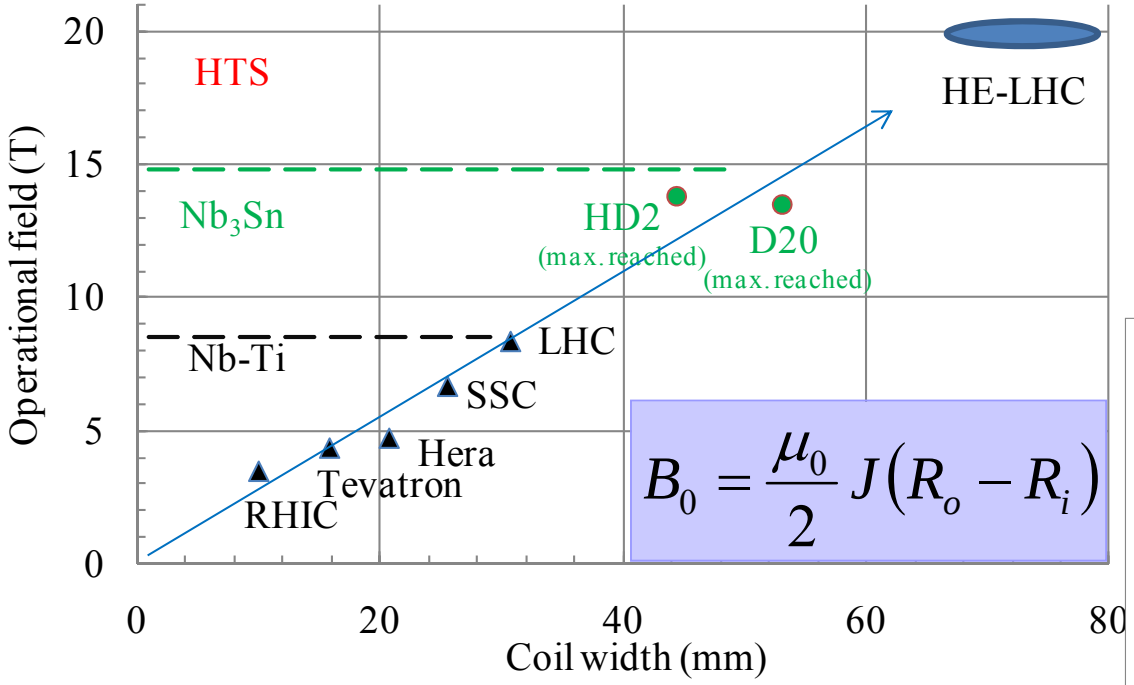
Material	T_C (K)
Nb	9.2
NbTi	9.5
Nb_3Sn	18.3
HTS	> 30

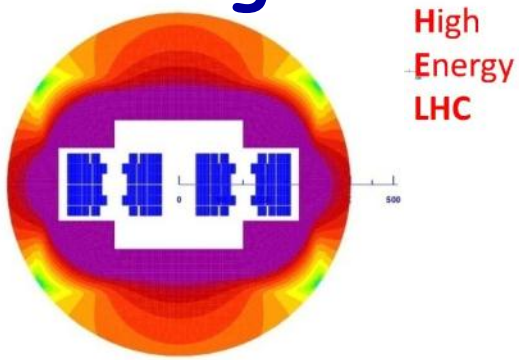


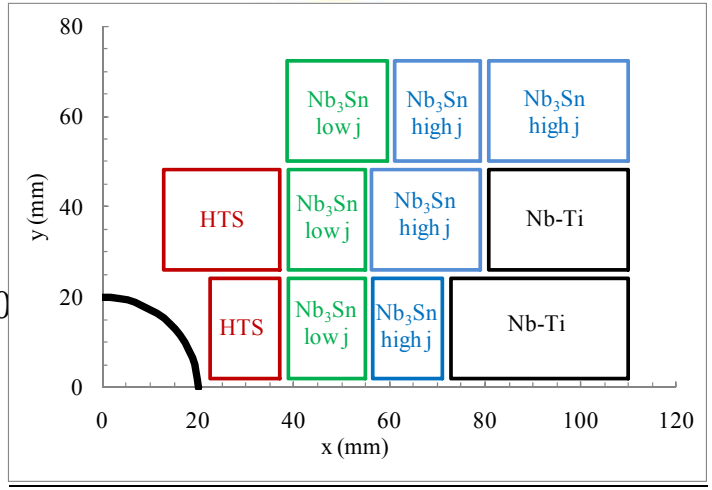
Essentiellement 2 types de conducteurs:

- NbTi, Nb3Sn soutiennent les forts courants, pas les forts champs → zones de ch^{ps} faibles
- HTS (Bisco,…) soutiennent les forts champs, pas les forts courants→ zones de ch^{ps} forts

High Energy-LHC: hybrid dipole design







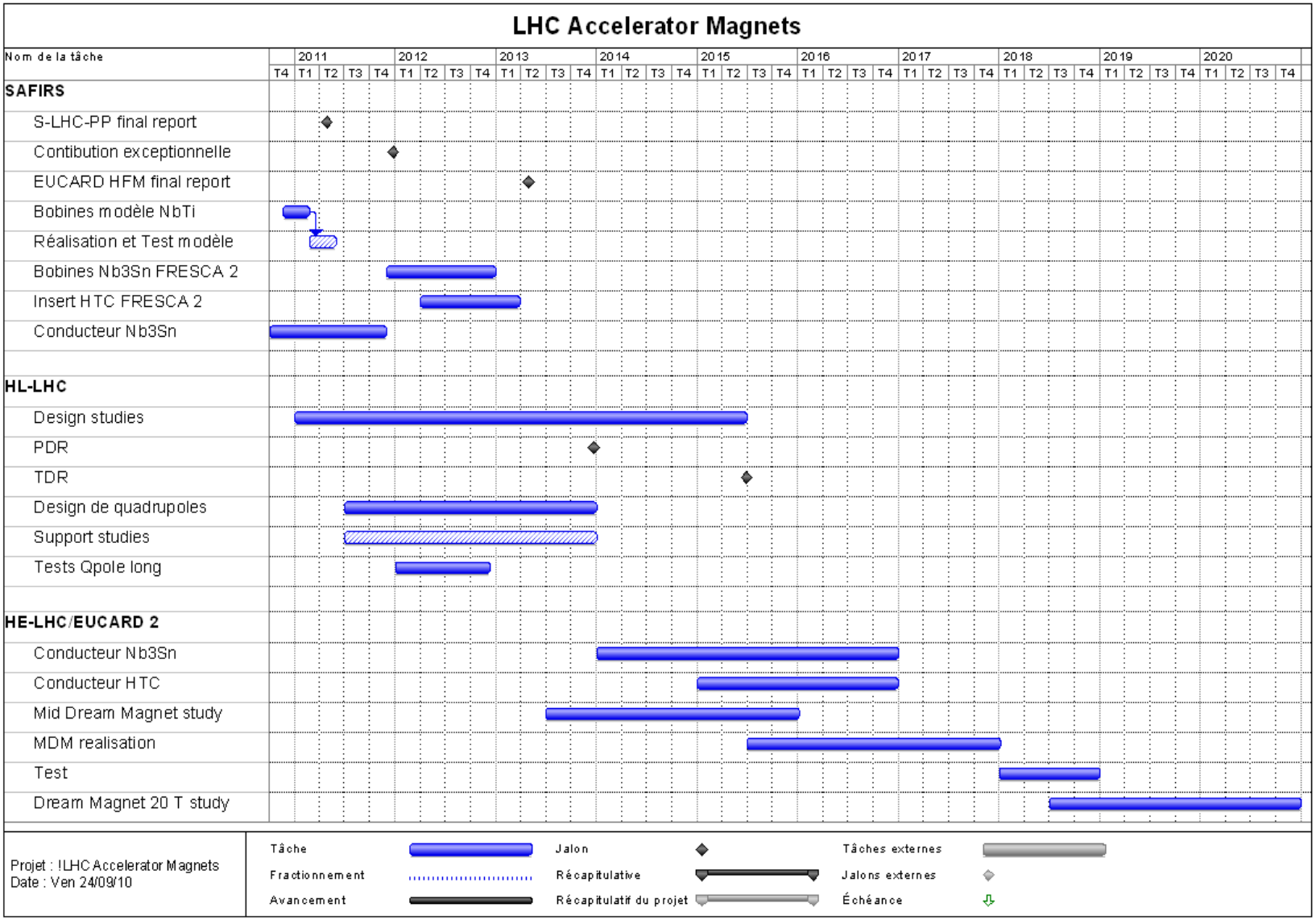
15 m	($/kg)	m^3	Kg	M$	%
Nb-Ti	200	0.12	960	0.19	5%
Nb$_3$Sn - h	800	0.16	1300	1.0	28%
Nb$_3$Sn - l	800	0.10	850	0.7	18%
Bi 2212	3000	0.07	620	1.9	49%
Total		0.45	3730	3.8	

Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

- Conducteur et bobines HTS
- Conducteur et dipôle Nb3Sn
- Conception d'aimants accélérateur hybrides

Financement via FP7 EuCARD2 IA

HL-LHC et HE-LHC: Feuille de Route Irfu



Usine à Higgs √s= 240 GeV : LEP3

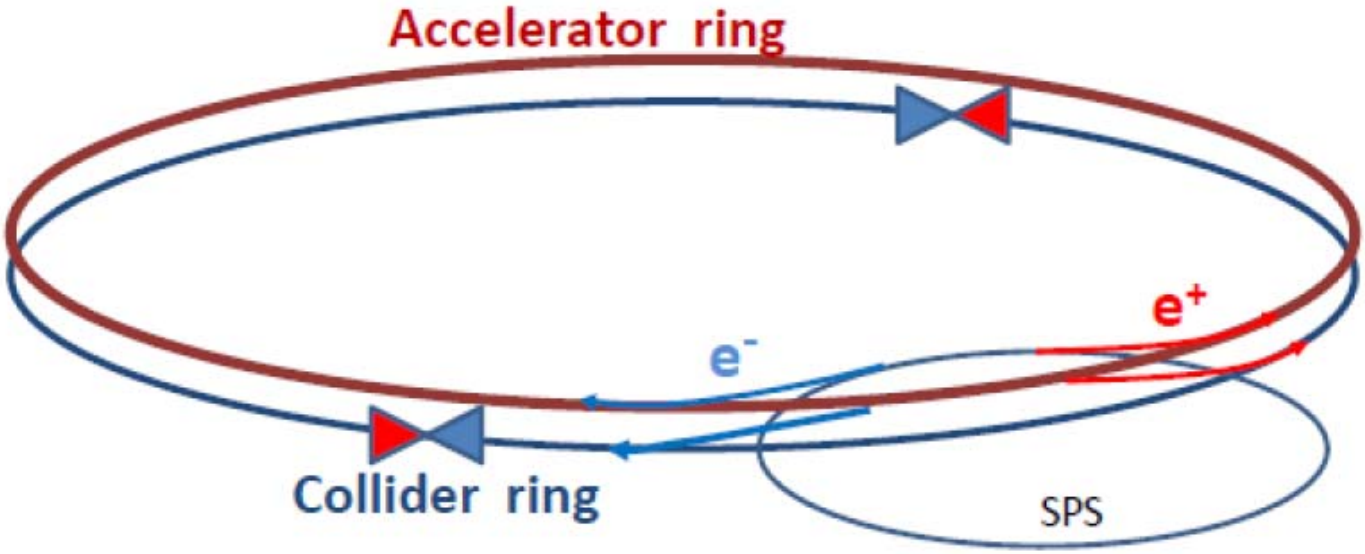
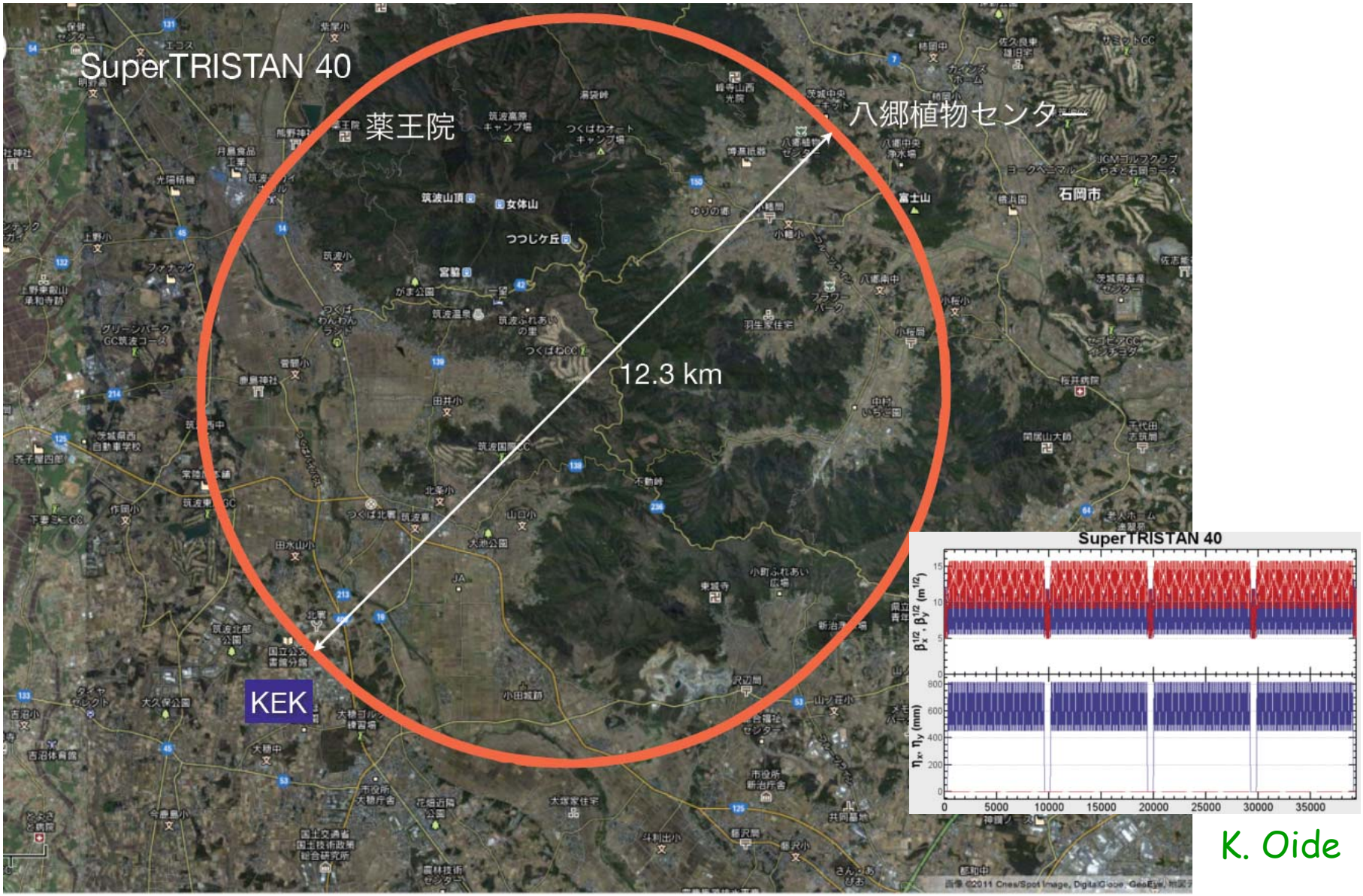


Figure 2 Possible two ring sketch for LEP3: a first ring (accelerator ring) accelerates electrons and positrons up to operating energy (120 GeV) and injects them at a few minutes interval into the low emittance collider ring in which the high luminosity $10^{34}/cm^2/s$ interaction points are situated.

A. Blondel, F. Zimmermann

⇒ 9 GV + 6 GV de RF-supra CW dans les deux anneaux
⇒ Schéma de croisement à angle 'crab-waist' pour 10 $nb^{-1}s^{-1}$ de luminosité

Usine à Higgs: SuperTristan (e.g. 40 km)



K. Oide

Usine à Higgs √s= 240 GeV: LEP3 vs. SuperTristan

Parameters Example

	TRISTAN	KEKB	LEP2	LEP3	DLEP	SuperTRISTAN 40	SuperTRISTAN 60	
Beam Energy	32	8 / 3.5	105	120	120	120	120	GeV
Circumference	3	3	27	27	53	40	60	km
Beam Current / beam	7	1400 / 1700	4	7.2	14.4	8.6	8.6	mA
Bunches / beam	2	1600	4	3	60	12	18	
β^* x / y	2000 / 40	1200 / 6	1500 / 65	150 / 1.2	200 / 2	80 / 2.5	80 / 2.5	mm
Emittances x / y		18 / 0.1	48 / 0.25	20 / 0.15	5 / 0.05	23.3 / 0.09	24.6 / 0.09	nm
Bunch length	10	6	3	3	1.5	3	3	mm
Beam-beam parameters	0.02 0.025	0.05 0.09	0.025 0.065	0.126 0.13	0.1 0.1	0.05 0.156	0.045 0.155	
Radiation loss / turn	300	4 / 2	2750	6900	3470	3420	2150	MV
RF Voltage	400	10 / 5	3640	9000	4600	5000	3300	MV
RF frequency	508	509	352	1300	1300	1300	1300	MHz
Total SR Power	4.2	5.6 / 3.4	22	100	100	59	37	MW
Luminosity / IP	0.04	21	0.13	13	16	10	10	/nb/s

K. Oide

Usine à Higgs: LEP3, SuperTristan

Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

- **Cryomodules 15-20 MV/m CW**

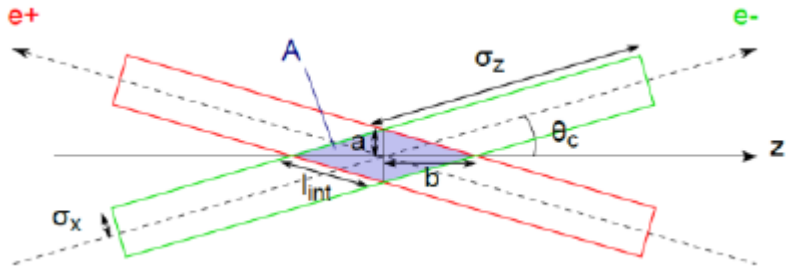
  e.g. Eacc(LEP3) = 2,5 x Eacc(LEP200) ~ 18 MV/m,
  Pcryo(LEP3) = 6 x Pcryo(LEP200) ~ 30 MW

- **Injecteurs 'LIL3'**

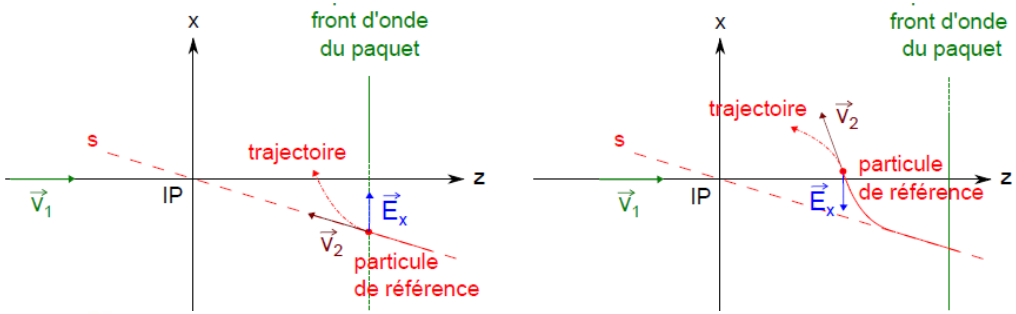
SuperTristan à 500 GeV

	SuperTRISTAN 80-Nano	
Beam Energy	250	GeV
Circumference	80	km
Beam Current / beam	1.4	mA
Bunches / beam	2	
β* x / y	34 / 0.26	mm
Emittances x / y	3.4 / 0.013	nm
Bunch length	1.9	mm
Beam-beam parameters	0.018 0.140	
Radiation loss / turn	32450	MV
RF Voltage	34700	MV
RF frequency	1300	MHz
Total SR Power	90	MW
Luminosity / IP	20	/nb/s

K. Oide



Pour les hautes énergie de faisceaux, limitation due au 'Beamstrahlung' : **même la trajectoire centrale est déviée dans une collision à angle.**



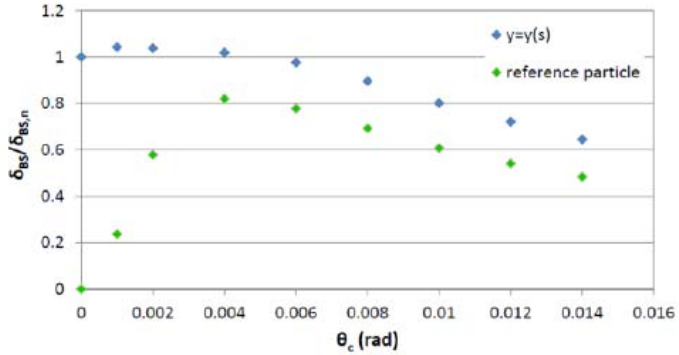


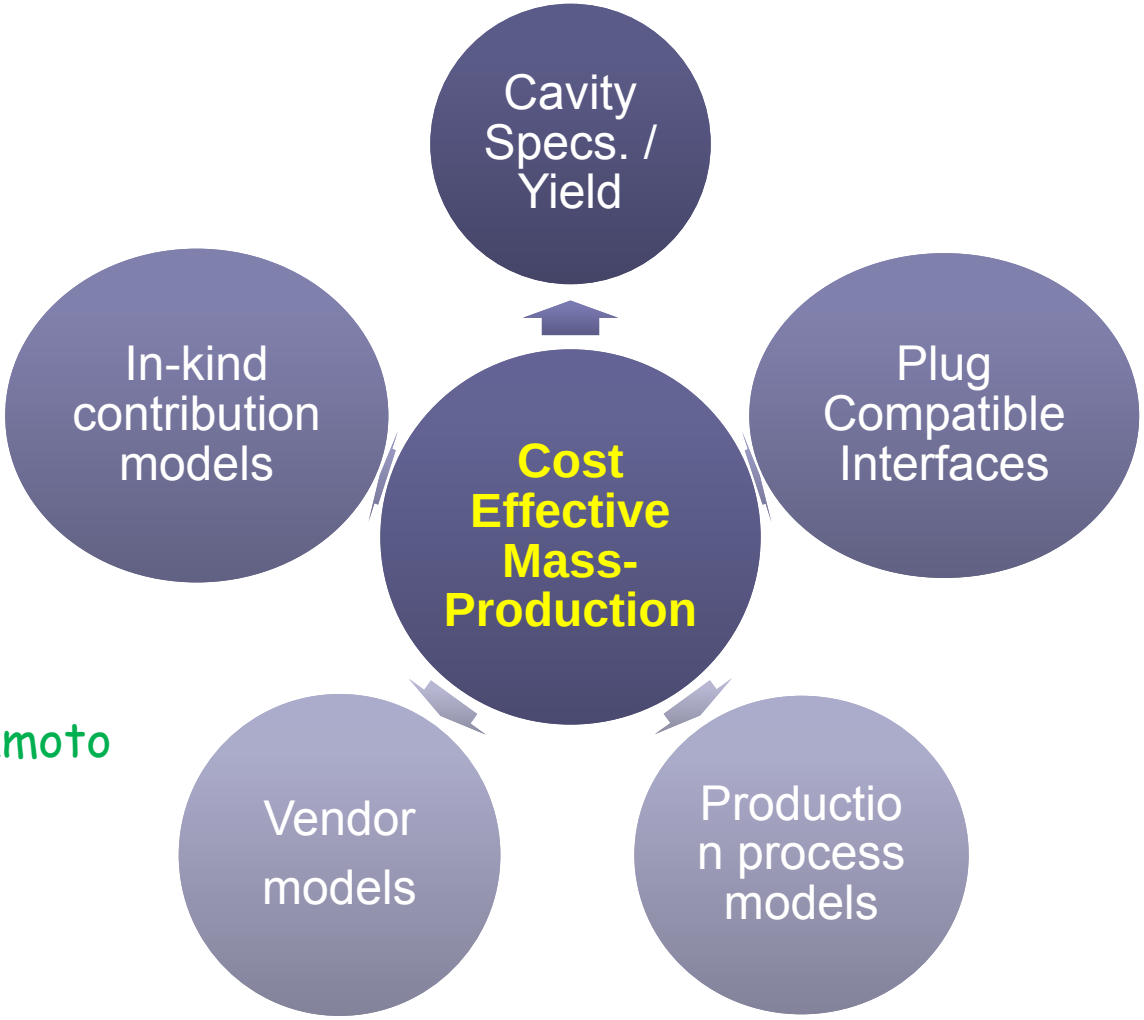
Figure 4: Beamstrahlung parameter as a function of θ_c for ILC nominal beam parameters, $\delta_{BS,n} = 2.1\%$.

R. Versteegen (IPAC 2011)

Collisionneurs e+e- : ILC

Principaux problèmes:

- Taux de réussite à l'acceptation des cavités 35 MV/m
- Organisation de la production à grande échelle sur 3 régions
- Coûts des cryomodules (~coût XFEL/2)
- Gouvernance mondiale



A. Yamamoto

Le projet ILC

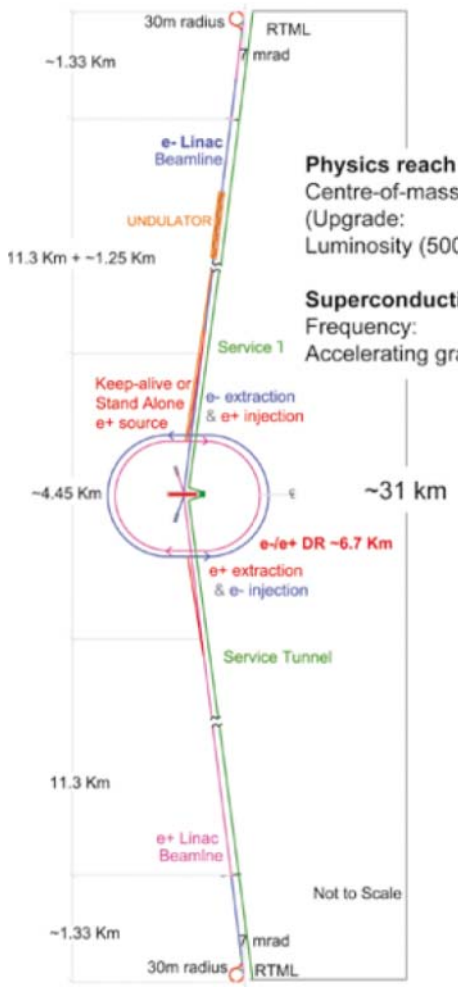
Les bases techniques qui fondent la construction de l'ILC existent dès aujourd'hui. Néanmoins, le projet bute sur deux difficultés majeures, **son coût** et la limitation de **sa portée en énergie**.

- **Son coût** est dominé par le coût de fabrication de l'accélérateur supraconducteur et de la technologie associée (16.000 cavités RF en Niobium massif pour 500 GeV c.m., 16.000 coupleurs coaxiaux, 700 klystrons, 2.000 cryostats, cryogénie) particulièrement dans son application pour les champs accélérateurs élevés.

- **Sa portée en énergie**, de l'ordre de 1 TeV, est limitée par le champ accélérateur maximum de 50 MV/m correspondant au champ magnétique critique du Niobium des cavités.

Par le développement d'un outil industriel pour l'assemblage des cryomodules XFEL, le SACM est déjà fortement positionné sur la problématique du coût.

Collisionneurs e+e- : ILC à √s=250-1000 GeV



Physics reach

Centre-of-mass energy:	200-500 GeV
(Upgrade:	1 TeV)
Luminosity (500 GeV):	2×10^{34} cm^{-2}s^{-1}

Superconducting RF

Frequency:	1.3 GHz
Accelerating gradient:	31.5 MV/m

Luminosité intégrée
200 fb^{-1}/an @ 250 GeV

IP and General Parameters			TF = Traveling Focus					L Upgrade	E_{cm} Upgrade	
Centre-of-mass energy	E_{cm}	GeV	200	230	250	350	500	500	1000	1000
									A1	B1b
Beam energy	E_{beam}	GeV	100	115	125	175	250	500	500	500
Lorentz factor	γ		#######	#######	#######	#######	#######	#######	9,78E+05	9,78E+05
Collision rate	f_{rep}	Hz	5	5	5	5	5	5	4	4
Electron linac rate	f_{linac}	Hz	10	10	10	5	5	5	4	4
Number of bunches	n_b		1312	1312	1312	1312	1312	2625	2450	2450
Electron bunch population	N_-	$\times10^{10}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,74	1,74
Positron bunch population	N_+	$\times10^{10}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,74	1,74
Bunch separation	Δt_b	ns	554	554	554	554	554	366	366	366
Bunch separation $\times f_{RF}$	$\Delta t_b f_{RF}$		720	720	720	720	720	476	476	476
Pulse current	I_{beam}	mA	5,8	5,8	5,8	5,8	5,79	8,75	7,6	7,6
RMS bunch length	σ_z	mm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,250	0,225
Electron RMS energy spread	$\Delta p/p$	%	0,206	0,194	0,190	0,158	0,124	0,124	0,083	0,085
Positron RMS energy spread	$\Delta p/p$	%	0,190	0,165	0,152	0,100	0,070	0,070	0,043	0,047
Electron polarisation	P_-	%	80	80	80	80	80	80	80	80
Positron polarisation	P_+	%	31	31	30	30	30	30	20	20
Horizontal emittance	$\gamma\varepsilon_x$	µm	10	10	10	10	10	10	10	10
Vertical emittance	$\gamma\varepsilon_y$	nm	35	35	35	35	35	35	30	30
IP horizontal beta function	β_x*	mm	16,0	14,0	13,0	16,0	11,0	11,0	22,6	11,0
IP vertical beta function (no TF)	β_y*	mm	0,34	0,38	0,41	0,34	0,48	0,48	0,25	0,23
IP RMS horizontal beam size	σ_x*	nm	904	789	729	684	474	474	481	335
IP RMS veritcal beam size (no TF)	σ_y*	nm	7,8	7,7	7,7	5,9	5,9	5,9	2,8	2,7
analytical estimates: Horizontal distruption parameter	D_x		0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2
Vertical disruption parameter	D_y		24,3	24,5	24,5	24,3	24,6	24,6	18,7	25,1
Horizontal enhancement factor	H_{Dx}		1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0
Vertical enhancement factor	H_{Dy}		4,5	5,0	5,4	4,5	6,1	6,1	3,5	4,1
Total enhancement factor	H_D		1,7	1,8	1,8	1,7	2,0	2,0	1,5	1,6
Geometric luminosity	L_{geom}	$\times10^{34}$ cm^{-2}s^{-1}	0,30	0,34	0,37	0,52	0,75	1,50	1,77	2,64
Luminosity	L	$\times10^{34}$ cm^{-2}s^{-1}	**0,50**	**0,61**	**0,68**	**0,88**	**1,47**	**2,94**	**2,71**	**4,32**
Average beamstrahlung parameter	Y_{av}		0,013	0,017	0,020	0,030	0,062	0,062	0,127	0,203
Maximum beamstrahlung parameter	Y_{max}		0,031	0,041	0,048	0,072	0,146	0,146	0,305	0,483
Average number of photons / particle	n_γ		0,95	1,08	1,16	1,23	1,72	1,72	1,43	1,97
Average energy loss	δE_{BS}	%	0,51	0,75	0,93	1,42	3,65	3,65	5,33	10,20
simulation: Luminosity	L	$\times10^{34}$ cm^{-2}s^{-1}	0,498	0,607	0,681	0,878	1,50	3,00	3,23	4,31
Coherent waist shift	ΔW_y	µm	250	250	250	250	250	250	190	190
Luminosity (inc. waist shift)	L	$\times10^{34}$ cm^{-2}s^{-1}	**0,56**	**0,67**	**0,75**	**1,0**	**1,8**	**3,6**	**3,6**	**4,9**
Fraction of luminosity in top 1%	$L_{0.01}/L$		91,3%	88,6%	87,1%	77,4%	58,3%	58,3%	59,2%	44,5%
Average energy loss	δE_{BS}		0,65%	0,83%	0,97%	1,9%	4,5%	4,5%	5,6%	10,5%
Number of pairs per bunch crossing	N_{pairs}	$\times10^3$	44,7	55,6	62,4	93,6	139,0	139,0	200,5	382,6

Collisionneurs e+e- : Lois d'échelle

Luminosité $\mathcal{L} \propto \dfrac{N^2}{\sigma_x \sigma_y}$

Emittance normalisée $\varepsilon_N = \gamma\varepsilon \propto \gamma^0$

Emittance 'géométrique' $\varepsilon = \sigma^* \Theta^* \propto \gamma^{-1}$

Profondeur de champ $\beta^* = \sigma^* / \Theta^*$

1ère hypothèse: fonctions optiques constantes

$$\beta^* \propto \gamma^0 \Rightarrow (LG_{\text{quad}}) \propto \gamma$$
$$\Rightarrow \sigma^* \propto \gamma^{-1/2} \; ; \; \mathcal{L} \propto \gamma$$
$$\Rightarrow \Theta^* \propto \gamma^{-1/2}$$

2ème hypothèse: $\sqrt{s}$ croissant

$$\beta^* \propto \gamma^{-1/2} \Rightarrow (LG_{\text{quad}}) \propto \gamma^{3/2}$$
$$\Rightarrow \sigma^* \propto \gamma^{-1} \; ; \; \mathcal{L} \propto \gamma^2$$
$$\Rightarrow \Theta^* \propto \gamma^0$$

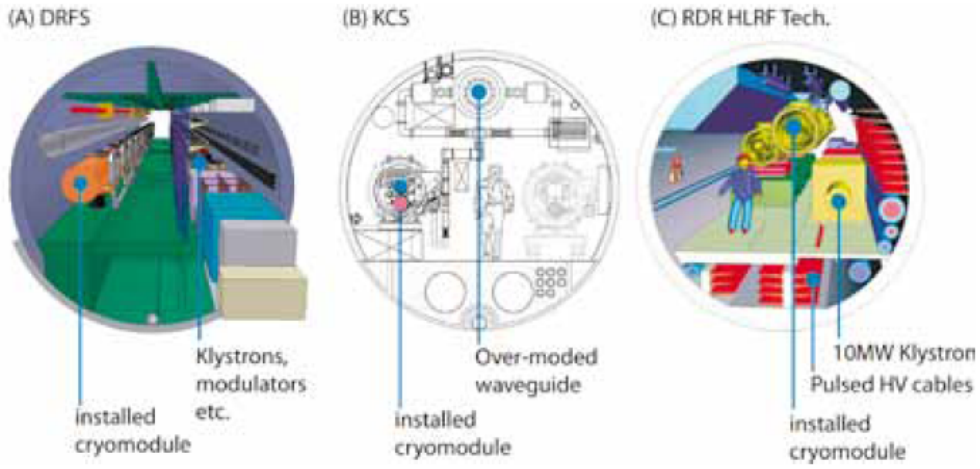
3ème hypothèse: $\sqrt{s}$ décroissant

$$\beta^* \propto \gamma^{1/2} \Rightarrow (LG_{\text{quad}}) \propto \gamma^{1/2}$$
$$\Rightarrow \sigma^* \propto \gamma^0 \; ; \; \mathcal{L} \propto \gamma^0$$
$$\Rightarrow \Theta^* \propto \gamma^{-1}$$

Collisionneurs e+e- : ILC à √s=500-1000 GeV

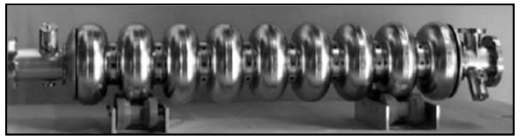
Figure 5.15 Tunnel geology of the CERN region.

Figure 4.2 Single-tunnel solutions for the main linacs: (a) distributed radiofrequency sources, where many small modular 800-kilowatt klystrons, modulators and associated power supplies are all installed in the tunnel; (b) klystron cluster system, where no active RF is installed in the tunnel, and the RF power is brought to the accelerator via long high-power over-moded waveguide system; and (c) the solution adopted for the European X-ray Free Electron Laser (ILC backup solution), where the 10-MW klystrons are installed in the tunnel, but driven by surface-located modulators connected via many high-voltage pulsed cables.



SCRF-ML Technology Required

	ILC 500	XFEL
RDR Parameters	**Value**	
C.M. Energy	500 GeV	17.5 GeV
Peak luminosity	$2x10^{34}$ $cm^{-2}s^{-1}$	-
Beam Rep. rate	5 Hz	10 Hz
Pulse time duration	1 ms	1 ms
Beam current	9 mA (in pulse)	1 mA
Av. field gradient	**31.5 MV/m**	**23,6 MV/m**
# 9-cell cavity	**15,873**	**808**
# cryomodule	**1,832**	**101**
# RF units	**560**	**25**



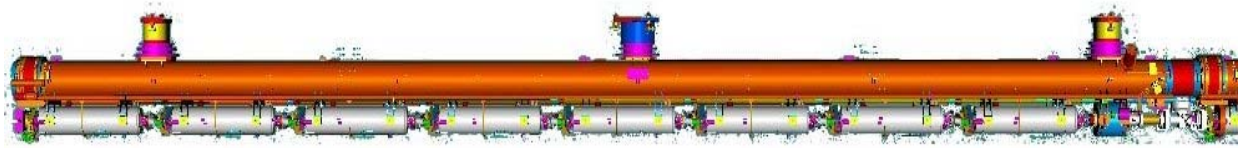
~20 x XFEL

~18 x XFEL

A. Yamamoto 11-04-14

Accélérateur Supraconducteur XFEL: 17.5 GeV

101 cryomodules

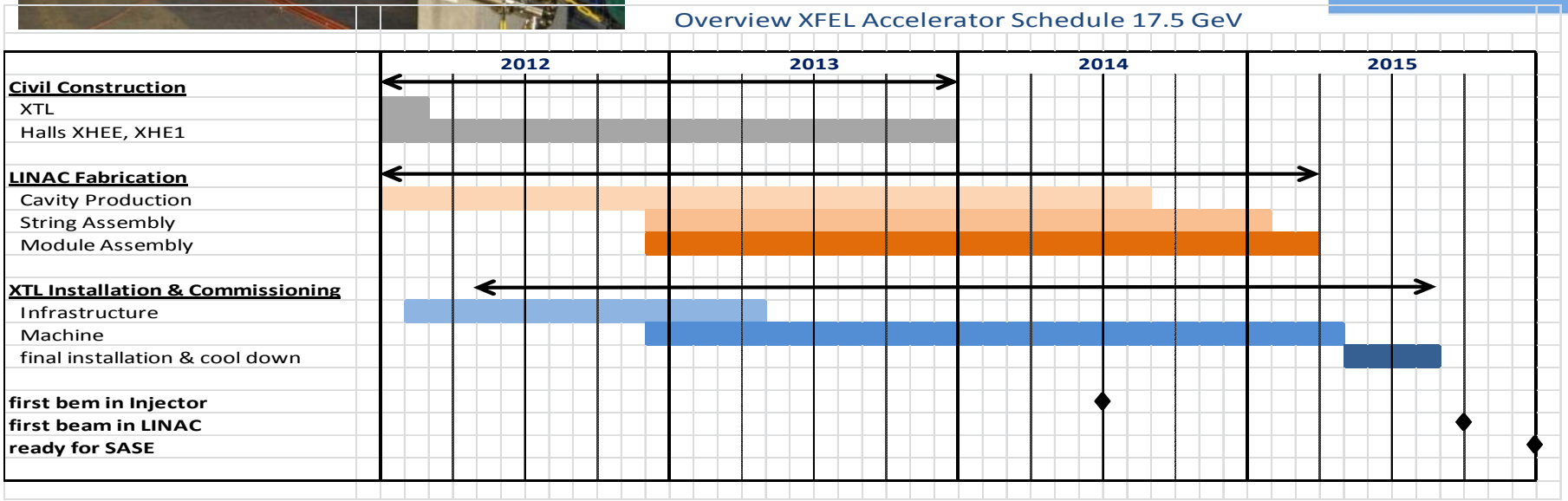


808 cavités accélératrices

1.3 GHz / 23.6 MV/m

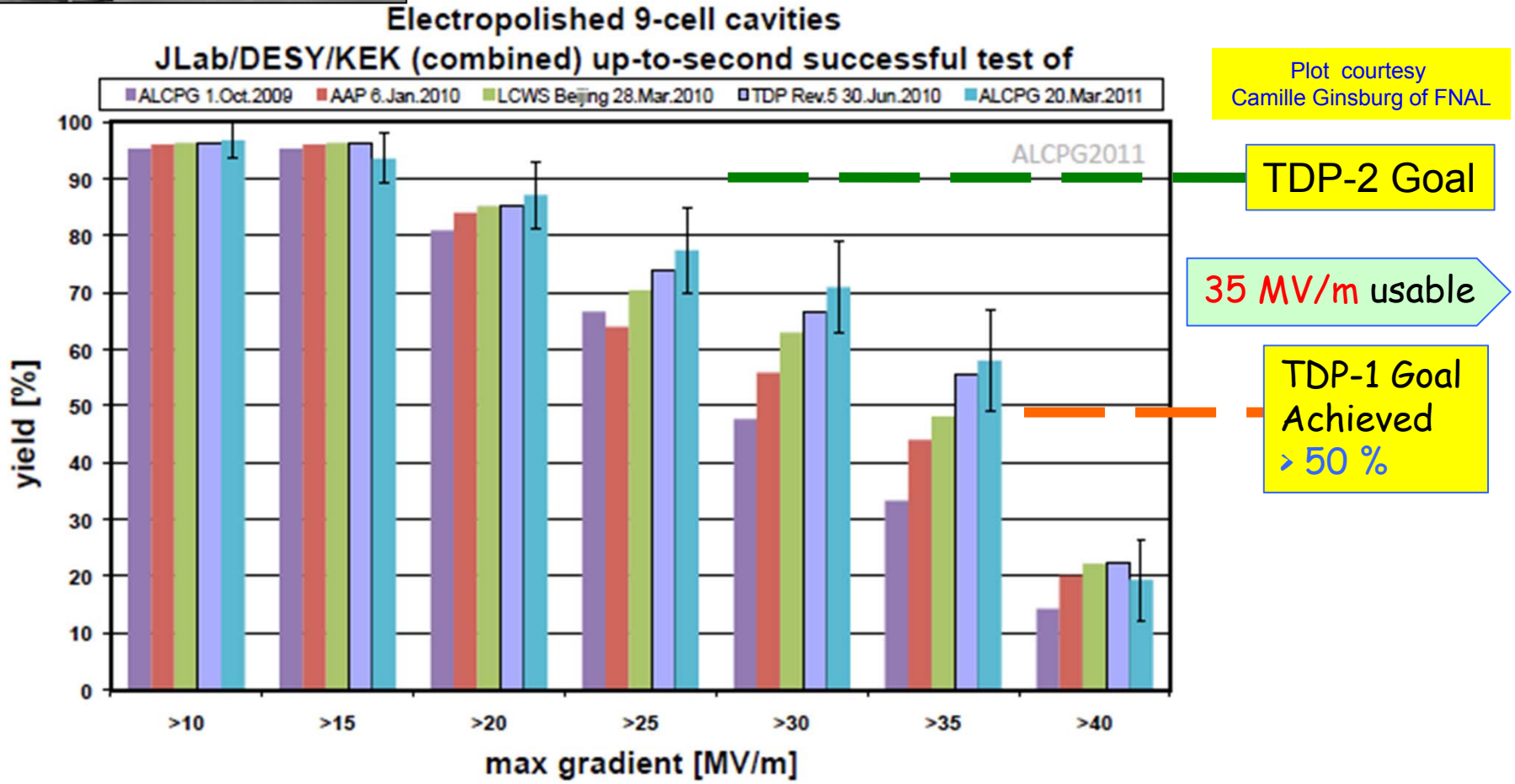
26 station RF

5.2 MW



Collisionneurs e+e- : ILC

Global ILC Cavity Gradient Yield



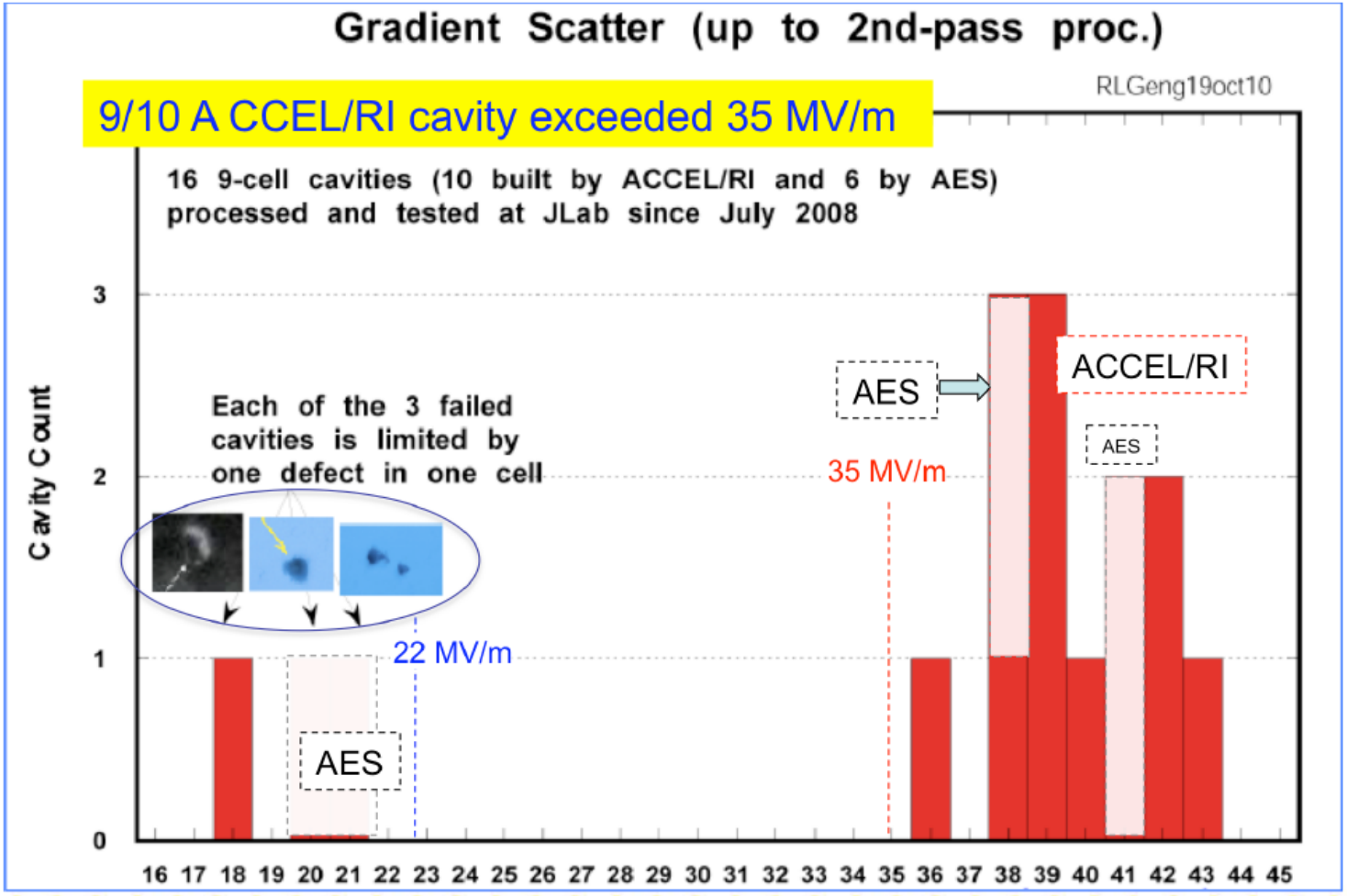
Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

- Electropolissage vertical et tests RF
- Cavités hauts gradients: développements multicouches, inspection optique

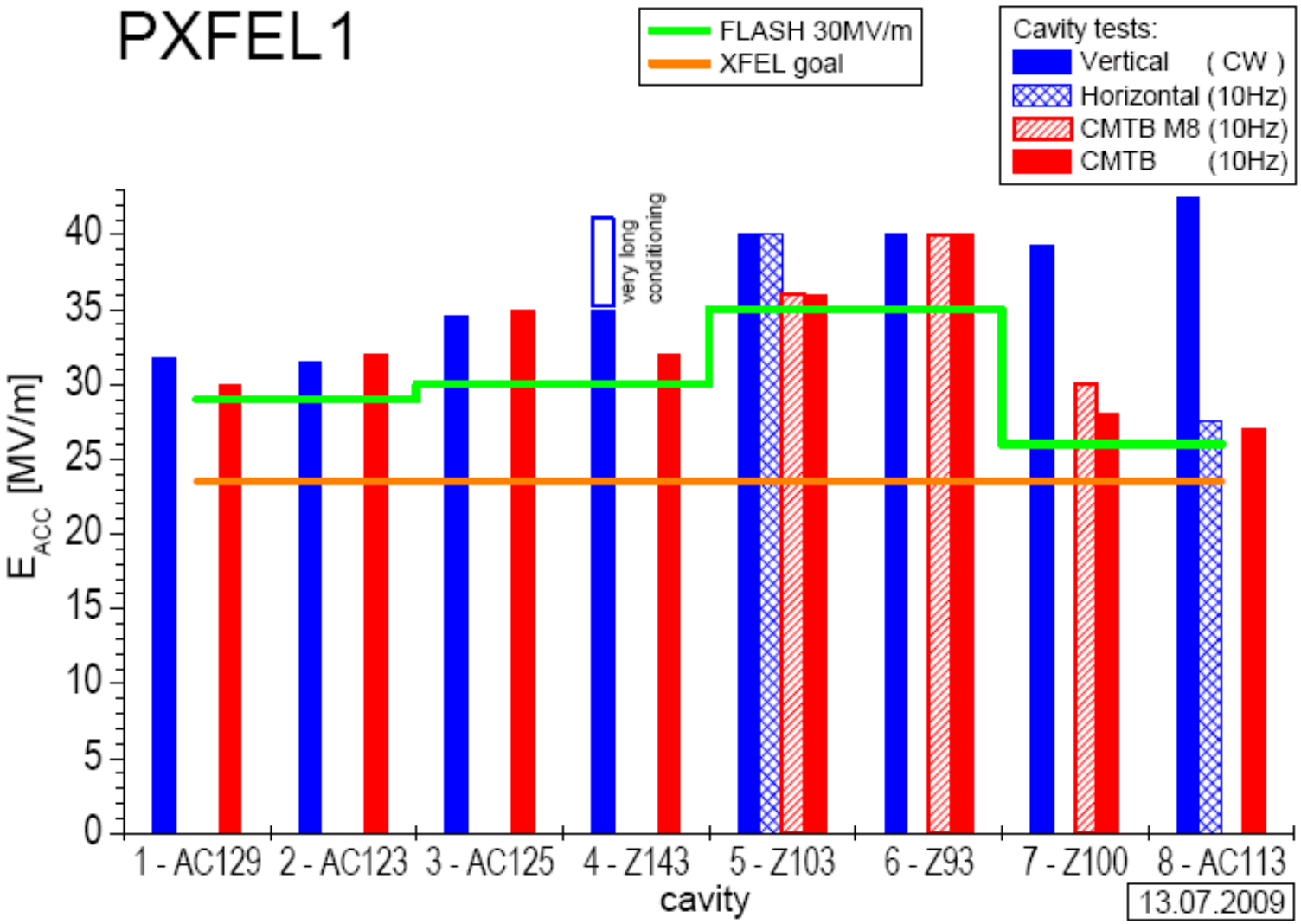
Collisionneurs e+e- : ILC

R. Geng

90 % Yield at 35 MV/m achieved with one vendor and JLab Process/Test



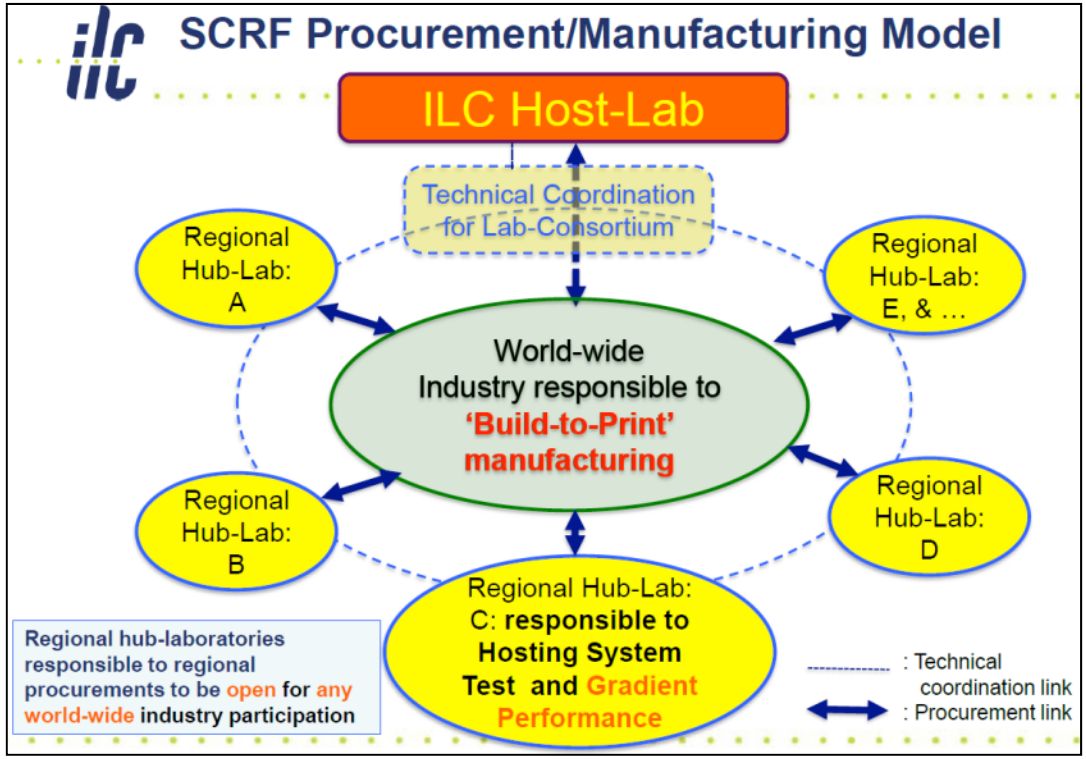
Module du Linac FLASH: <Eacc> = 30 MV/m



1. First XFEL prototype module (PXFEL1) = 10th Module from DESY
2. Based on a cryostat fabricated in China / IHEP Beijing
3. Seventh module installed in FLASH accelerator ⇒ 1 GeV energy.

Collisionneurs e+e- : ILC

Organisation de la production à grande échelle sur 3 régions



A. Yamamoto

Pour ILC 500 GeV avec ~2000 cryomodules: le but est d'atteindre une cadence de production de 2 cryomodules/semaine/5 hubs → 6 ans de construction

Pour XFEL avec 100 cryomodules : 1 CM / semaine
Les infrastructures sont compatibles avec une cadence de 2 CM / semaine

Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

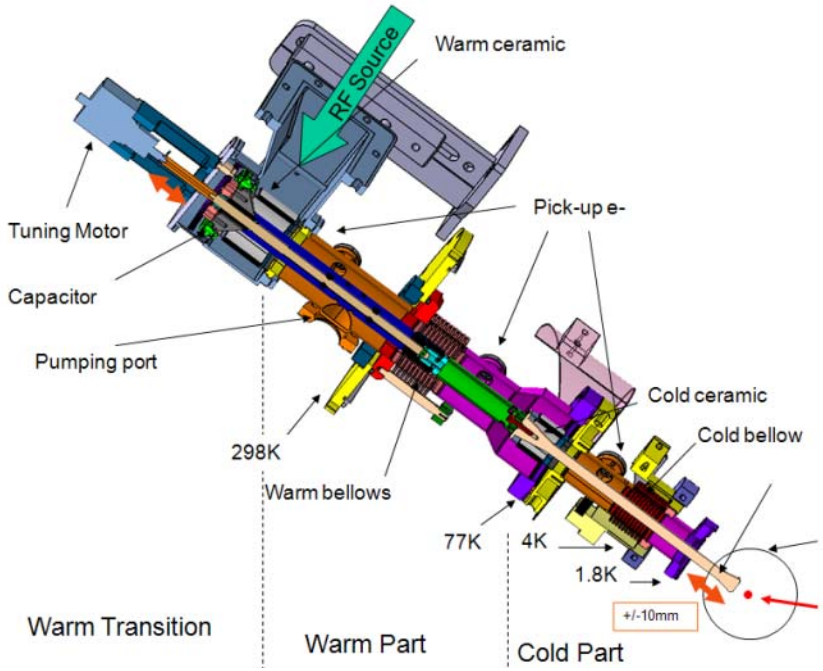
- **Assurer un rôle de 'Hub' (ou 'Tier 1') sur les infrastructures construites pour XFEL au LAL-Orsay et Irfu-Saclay**
- Soutien aux industriels français : Thales, ALSYOM, SDMS, Aperam, Jehier, Alstom, etc… et européens: RI, E.Zanon, BNG, Plansee, Heraeus, VAC, etc…

Collisionneurs e+e- : ILC

Outils de Production XFEL @ LAL-Orsay

800 coupleurs de puissance

- Fourniture
- Conditionnement RF (0.5 MW, 500 µs)



Collisionneurs e+e- : ILC

Outils de Production XFEL @ Irfu

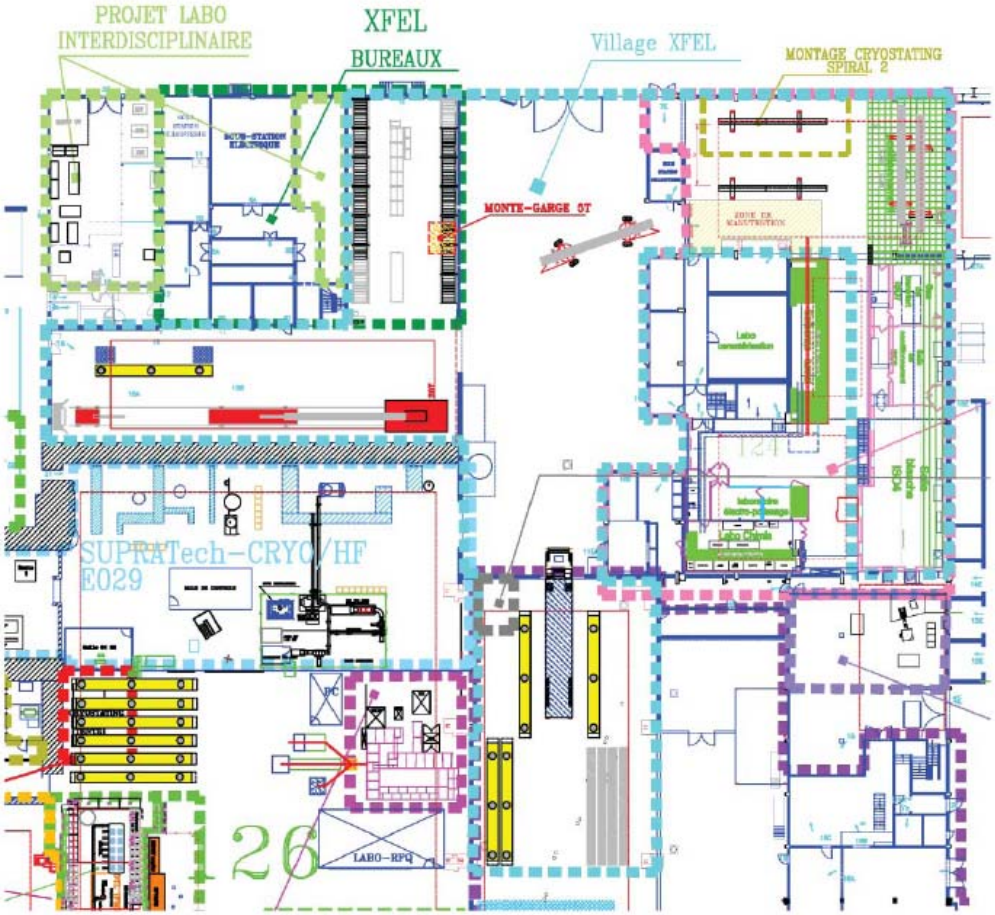


Figure 3-2 : Plateau technique des stations de montages.

Collisionneurs e+e- : ILC

Réduction des coûts de fabrication

Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

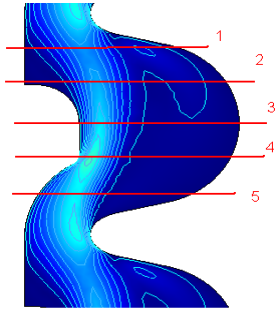
- Compléter les 3 études d'industrialisation menées par DESY et le CERN
  - Production de 16 000 cavités, par RI GmbH (ex ACCEL)
  - Production de 2 000 cryomodules, par E.Zanon (Italie)
  - Intégration de 2 000 cryomodules, par BNG GmbH
  - Coupleurs RF ? Quadripôles ? Klystrons ?
- Ouvrir la compétition sur la production de cavités ILC
- Maîtriser/réduire les coûts de production des cavités, coupleurs et cryomodules
  - Simplification des traitements de surface (VEP, réparation par polissage mécanique, étuvage rapide)
  - Brasage et cuivrage de coupleurs RF
  - Blindages magnétiques double couches
  - Manteaux de superisolation
  - Simplification des procédures (visserie ultra-propre)
  - Simplification des montage en salle blanche (nettoyage, Qpôle hors SB,…)

Traitements de surface et Electropolissage Vertical

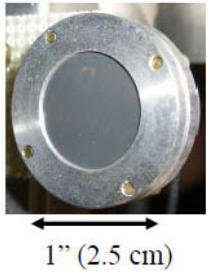
BUT: Traitement (final EP) + Rinçage & test (VT + Cryholab) de X cavités (tbd) ILC

➢ **Enrichissement infrastructures Supratech**

- ❑ Installation Electro-Polissage Vertical (EPV) + Modélisation (COMSOL)
  - Possibilité combiner: Chimie + Rinçage
  - Optimisation procédé (forme cathode)

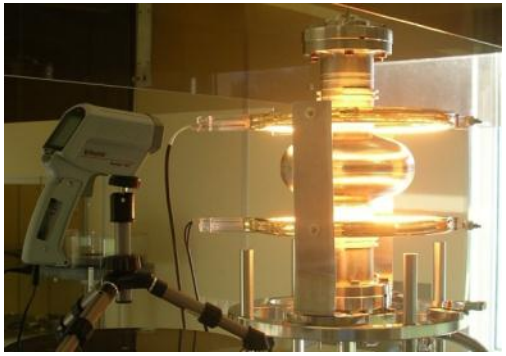


- ❑ Aménagement zones de tests RF
  - Aménagement cryostat pour VT 9cellules
  - Développement localisation quench par 2nd son (huit capteurs OST)



➢ **Traiter cavités avec paramètres issus de la R&D Saclay**

- EP Bas Potentiel (Priorité Haute)
- Rinçage Chloroforme (Vs Ethanol) (Priorité Moyenne)
- Etuvage rapide pour cavité 9 cellules (Optionnel)
- Nouveaux électrolytes (Optionnel)



Positionnement sur les Quadripôles ILC

Les travaux de préparation de l'assemblage des cryomodules XFEL ont mis en évidence :
1) l'impact très lourd de l'intégration des quadripôles, avec culasse super-ferrique monobloc du type CIEMAT, dans le train de cavités en salle blanche (difficulté de lavage, de manutention avec chariot dédié, risque de pollution) pour un élément qui, au contraire des cavités RF, n'a aucune raison *essentielle d'entrer en salle blanche ISO4.*
2) le manque de maturité de la conception des amenées de courant dont la conception finale n'est pas encore déterminée et qui impacte les gammes de montages dans le hall d'enfournement du cryomodule.

Pour l'ILC, la maille FODO de focalisation prévoit d'équiper **un cryomodule sur trois d'un quadripôle** placé au centre du train de cavité pour optimiser son alignement transverse. Le nombre total de quadripôles froids est donc de l'ordre de 700 pour les 2 accélérateurs linéaires de 250 GeV.

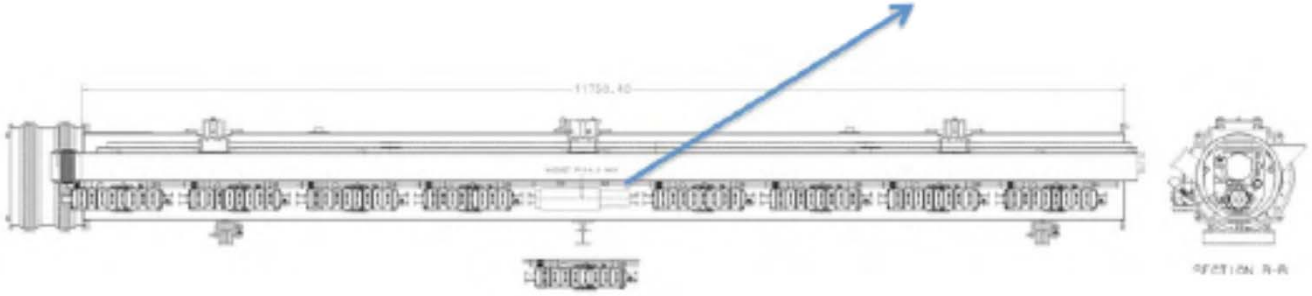
Une conception de quadripôle permettant l'intégration de la **chambre à vide sur le train de cavités** en salle blanche et l'intégration de la **masse froide du quadripôle sur les rails en sortie de salle** blanche diminuerait les coûts d'assemblage et les risques sur les performances des cryomodules.
Deux options sont possibles :
1) quadripôle avec masse froide super-ferrique à 2 coques, proposée par A. Yamamoto
2) quadripôle avec une masse froide constituée de 4 pôles supraconducteurs NbTi.

ILC : quadripôles froids du Linac

- **Components in Cryomodule**
  - G-integral : 36 T
    Aperture: 78 mm
  - Alignment: < 100 µm

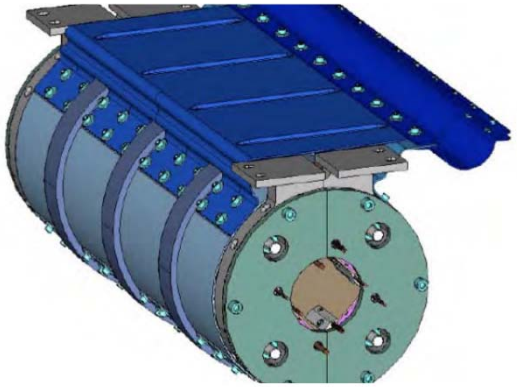
TABLE IV QUADRUPOLE SPECIFICATION.

Parameter	Value
Integrated peak gradient	36 T
Aperture	78 mm
Effective length	660 mm
Peak gradient	54 T/m
Field non-linearity at 5 mm radius	0.05 %
Dipole trim coils integrated strength	0.075 T-m
Magnetic center stability	5 µm
Vertical/azimuthal offset in cryomodule	0.3 mm/0.3 mrad
Quantity required	560

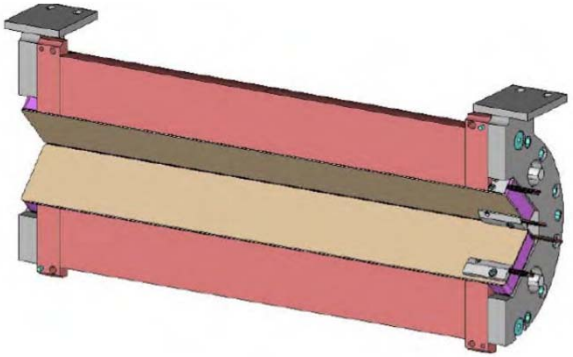


ILC: quadripôles froids du Linac

- Un concept à aimant superferrique, refroidi par conduction, existe déjà (A. Yamamoto, juillet 2010).



- Si nécessaire et encore envisageable, un étude détaillée avec aimant supraconducteur sans fer (ou fer seulement pour blindage) pourrait être entreprise.

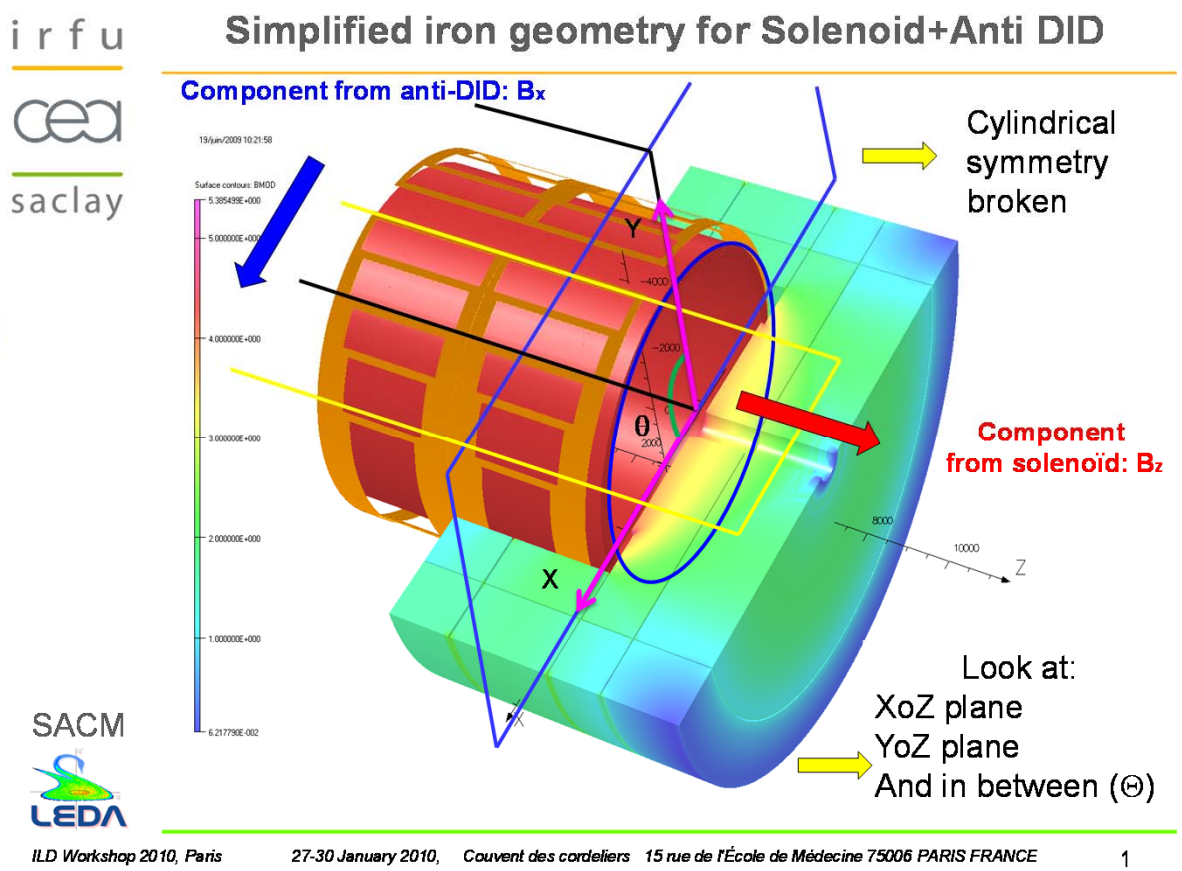


Positionnement sur les Aimants des détecteurs

Activité passée:

- Etude magnétique du détecteur ILD pour l'ILC: optimisation de la bobine dans son blindage (homogénéité, anti-DiD)

- Participation à des réunions de développement de nouveaux conducteurs, type solénoïde CMS, pour les aimants de détecteurs des futurs collisionneurs



Le projet CLIC

Le projet CLIC repose des sauts technologiques très ambitieux :

• établir un champ accélérateur de 100 MV/m pendant 156 ns dans les structures périodiques de 12 GHz

• la génération par une photo-cathode d'un faisceau secondaire (drive beam) de 8,4 nC par paquet et le transport du faisceau de 100 A

• la stabilisation des éléments magnétiques de la région d'interaction à une fraction (0,14) de nanomètre pour un opération pulsée à 50 Hz

• la synchronisation des faisceaux primaires et secondaires (24 'drive beam' par linac) à 30 fs

• le fonctionnement simultané de 200 000 structures accélératrices (pour 3 TeV c.m.).

La faisabilité technique du projet doit être décrite dans un 'Technical Design Report' à l'horizon 2020.

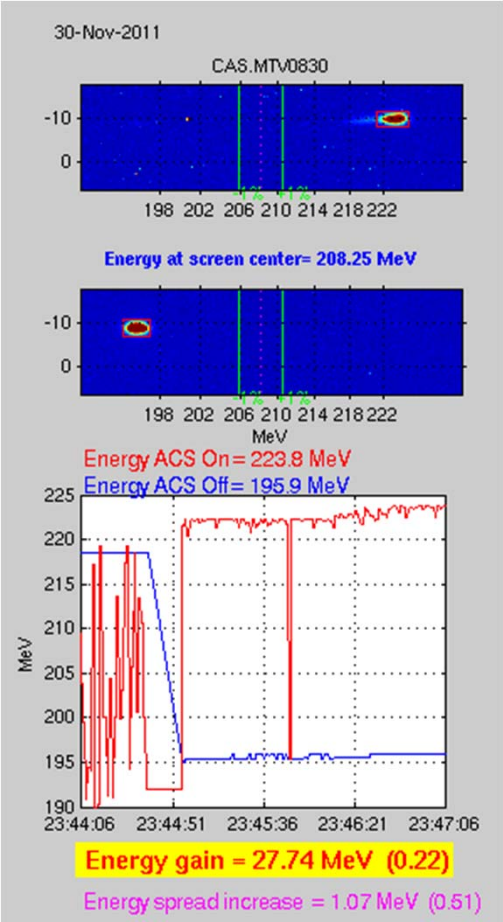
CLIC

Deux pôles d'activité se dégagent :

- la recherche des hauts gradients en RF des structures accélératrices 12 GHz
- les techniques de production des électrons et positons, de stabilisation, de mesure et de contrôle des faisceaux, notamment au point d'interaction.

CTF3/CALIFES

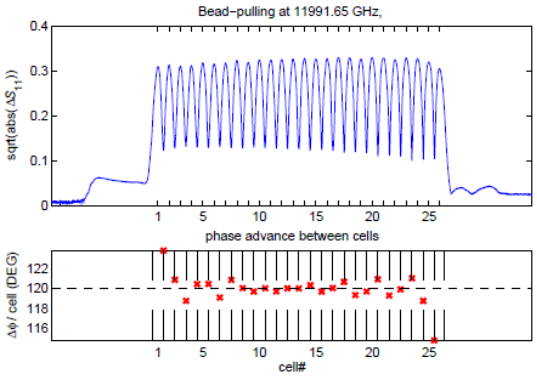
Gradient d'accélération 132 MV/m pour pulse de 80 MW – 240 ns
Peu de claquages – faible dispersion en énergie



En 2010 et 2011, plusieurs cavités accélératrices 12 GHz en cuivre type CLIC ont atteint un gradient accélérateur de 100 MV/m avec une probabilité de claquage relativement faible (de 10^{-3} à 10^{-7} /impulsion/m).

CLIC: Structures accélératrices

Structures CLIC Irfu-Mécachrome-Thales

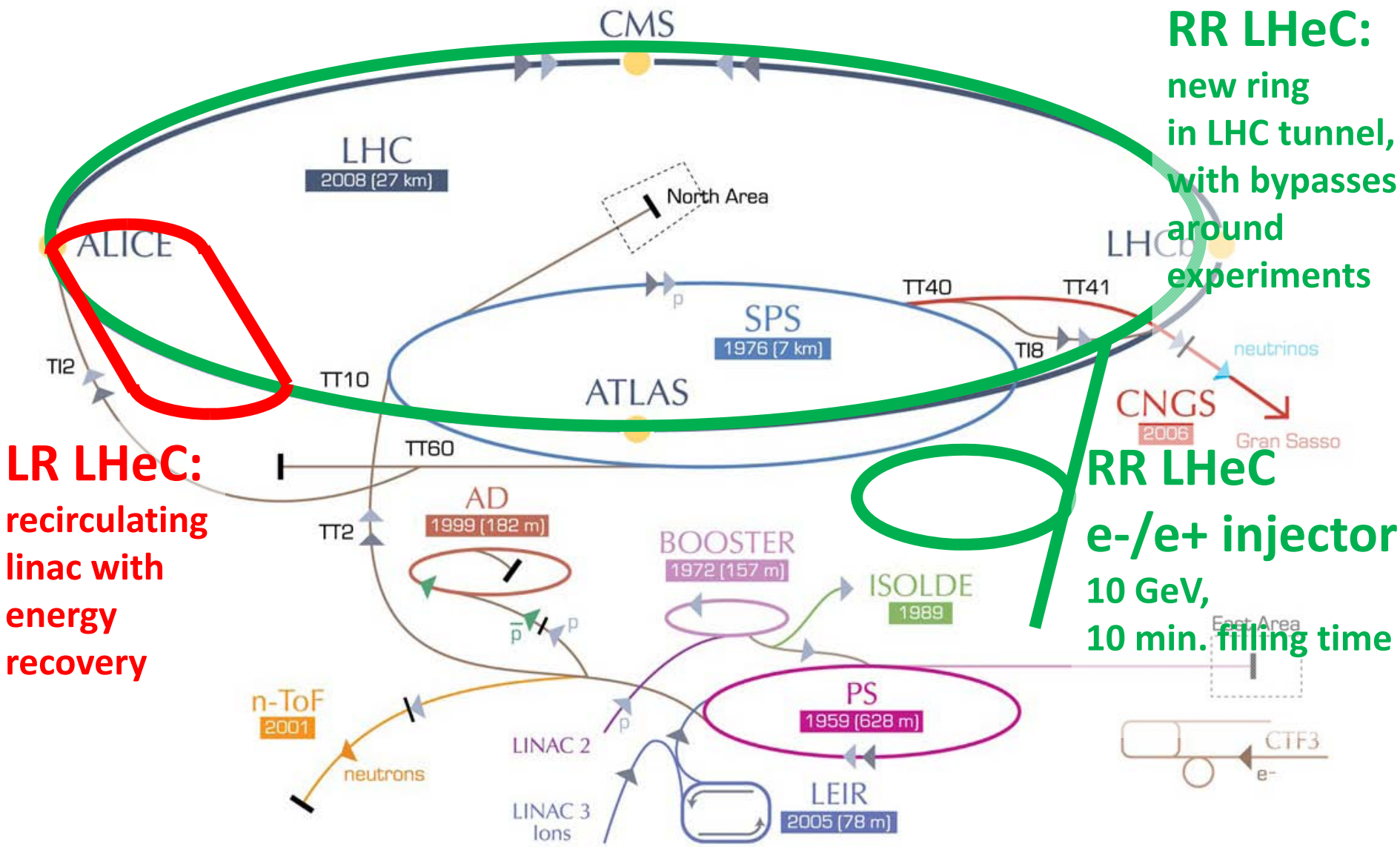


Pour la période 2012-2016, la faisabilité technique de la cavité RF de base CLIC « toute équipée » reste à démontrer, en intégrant en particulier un réseau d'absorbeurs hyperfréquence permettant d'atténuer fortement les modes supérieurs. Les structures accélératrices seront ensuite testées en puissance à l'aide de klystrons ou intégrées à des modules CLIC à deux faisceaux pour des essais avec faisceau sur CTF3.

Plan de développement à 10 ans

- **Conception RF des structures à onde progressive haut gradient**: modélisation de l'extraction, atténuation et détection des modes supérieurs dans les cavités avec comme application la mesure de position transverse du faisceau et éventuellement la détection de claquages (diagnostics RF).
- **Ingénierie des cavités haut gradient en cuivre**: l'objectif est d'améliorer la maîtrise des procédés de fabrication tels que l'usinage d'ultra-précision, l'assemblage haute température par diffusion et par brasage, les traitements de surface par attaque chimique et l'assemblage en environnement ultra-propre.
- **Fabrication de structures accélératrice type CLIC**: les caractéristiques propres aux structures CLIC seront intégrées progressivement avec une optimisation du design en collaboration avec nos partenaires industriels.
- **Test en puissance RF des structures accélératrices haut gradient 12 GHz** : il est primordial d'accroitre rapidement les capacités de test en puissance. L'implantation d'une nouvelle station d'essai 12 GHz à l'Irfu sur le schéma klystron-modulateur-compresseur d'impulsion serait d'un grand intérêt scientifique et technique.
- **Opération des structures accélératrices à CTF3** : les structures seraient intégrées à des modules CLIC à deux faisceaux 12 GHz, l'objectif étant de caractériser complètement les cavités en environnement accélérateur.

Collisionneur LHeC

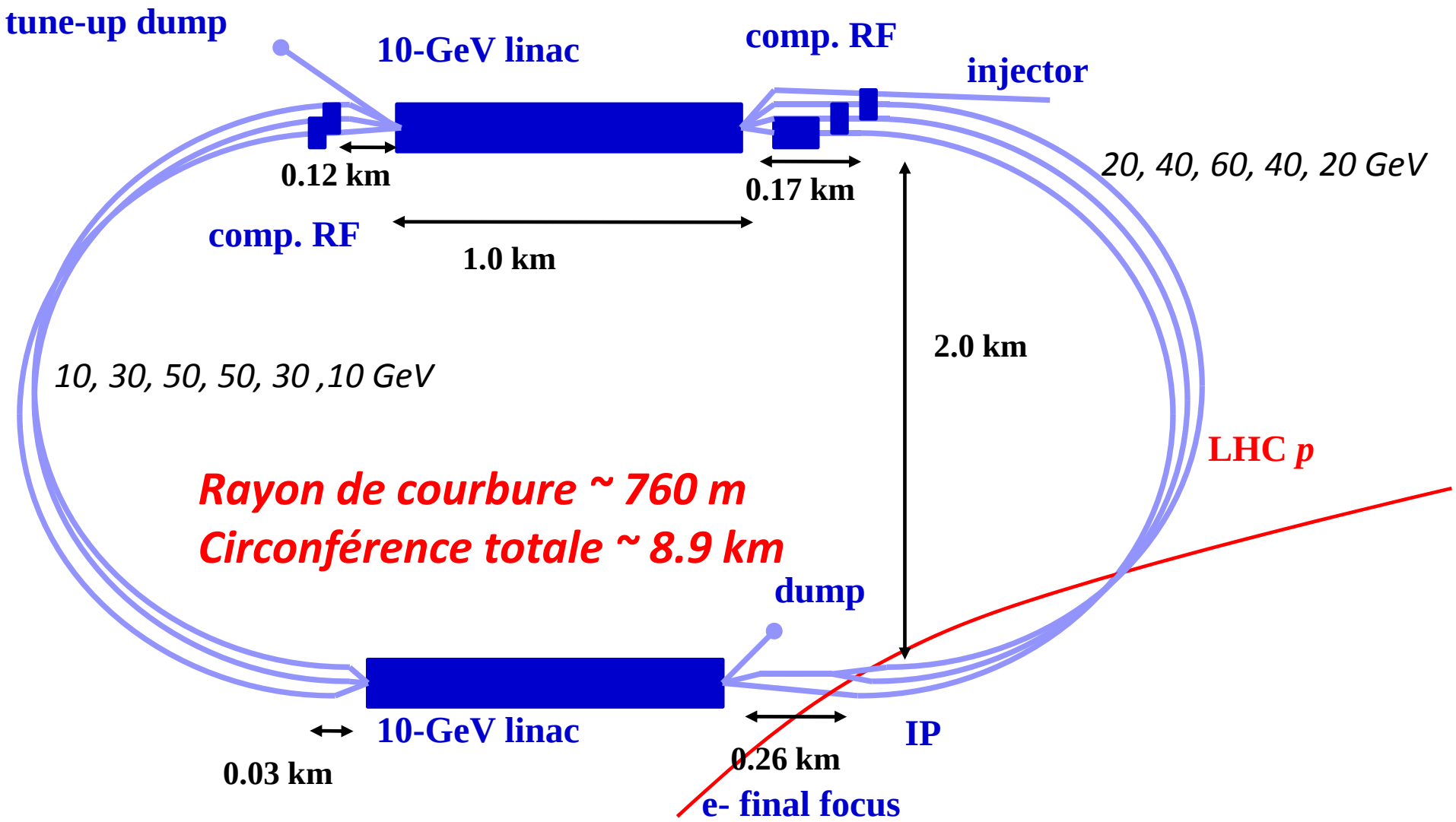


RR LHeC:
new ring
in LHC tunnel,
with bypasses
around
experiments

LR LHeC:
recirculating
linac with
energy
recovery

RR LHeC
e-/e+ injector
10 GeV,
10 min. filling time

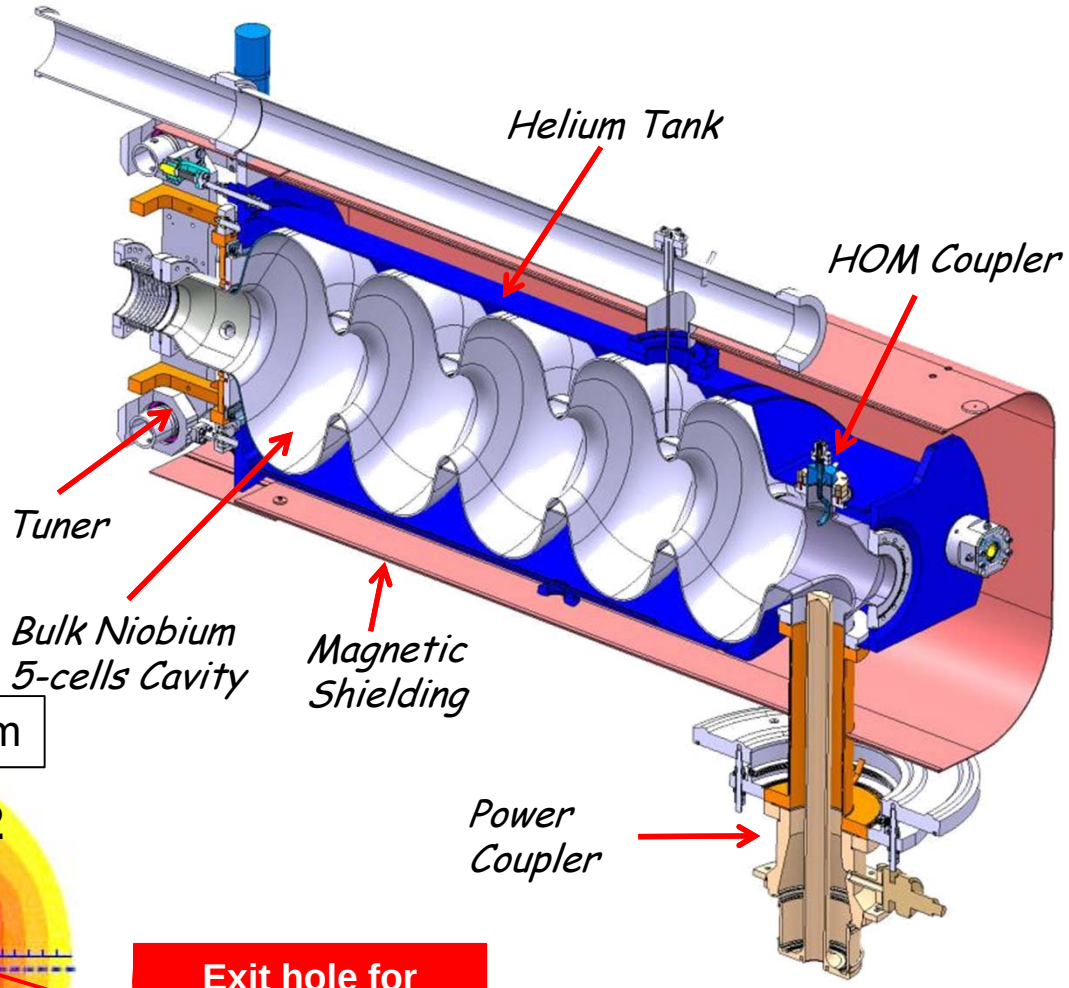
Collisionneur LHeC:
Option 'Energy Recovery Linac' (ERL)

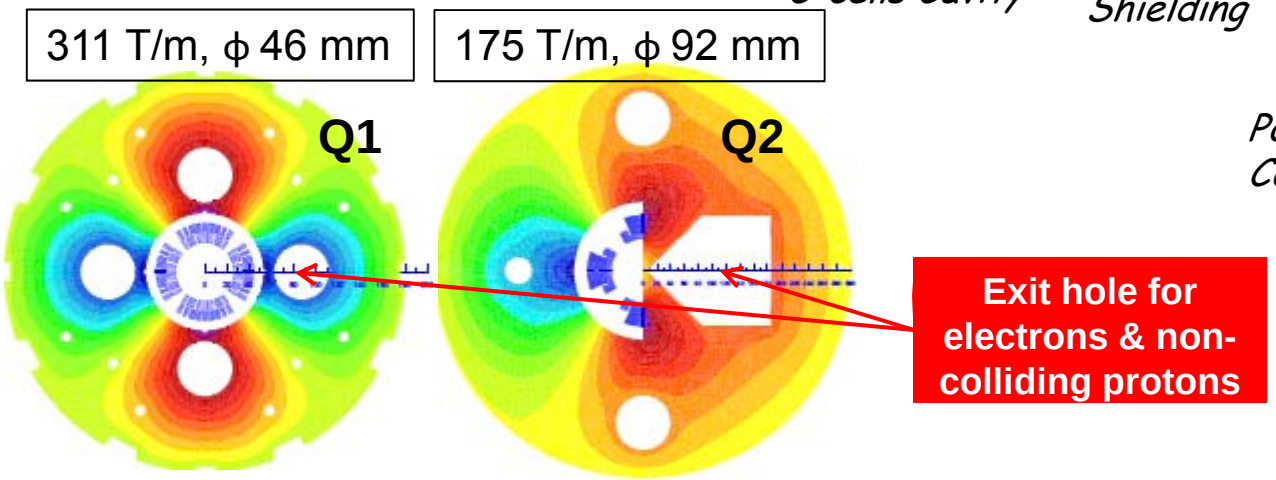


Collisionneur LHeC

Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

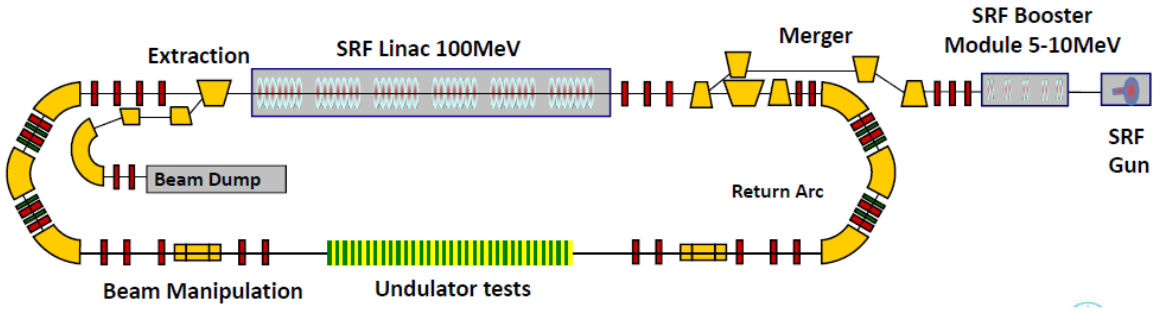
- Dynamique faisceau (région d'interaction e^-p, stabilité linac e^-)
- Source de positrons dans l'option e^+p
- **Cryomodule 20 MV/m CW**
- **Triplet quadripôles**





Cryomodule Accélérateur SRF CW à Haut Gradient

Cornell ERL



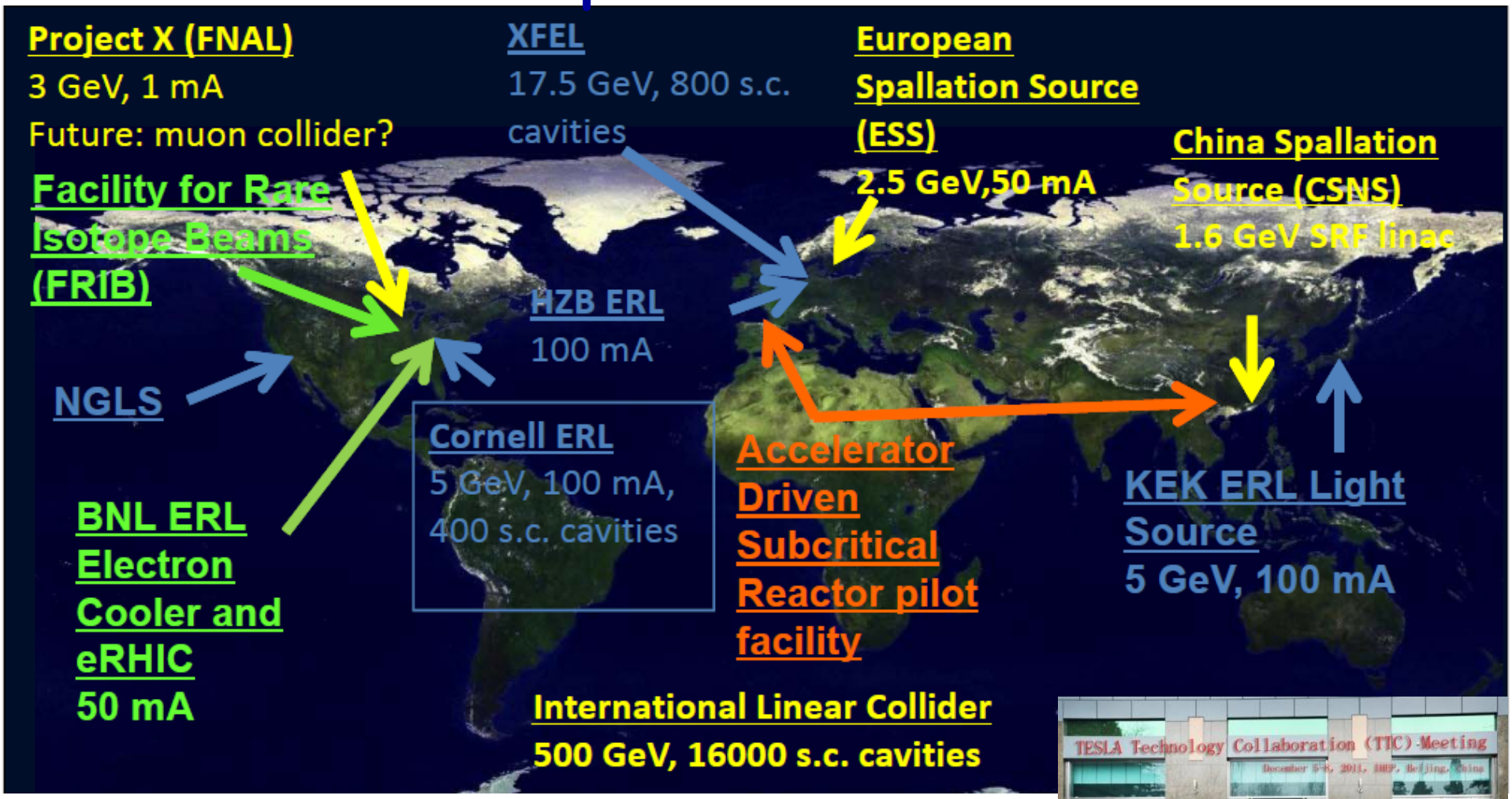
Projet B*ER*LinPro à HZB

Principales applications: collisionneurs circulaires, sources de lumière CW et ERL, Eurisol, LUNEX5 Phase2,

Principaux défis de R&D, dans le périmètre Irfu-IN2P3:

- **Canons à électrons**
- **Cryomodules 15-20 MV/m CW**
  1. **Conception et tests cavité à faible dissipation**
  2. **Conception et tests coupleur > 50 kW CW et coupleurs HOM**
  3. **Conception et tests système d'accord en CW**
  4. **Conception/fabrication cryostat (e.g. blindages magnétiques)**
  5. **Cryogénie à haut rendement**

Déploiement des accélérateurs RF Supra dans le monde



Collaboration TTC
55 Instituts:
Laboratoires d'idées

Programme expérimental de CILEX

salle HE1 : courtes focales

- o accélération d'ions
- o génération harmoniques (HHG), laser X
- o physique hauts champs (solid, gas, vacuum)
- o cibles solides mais non exclusivement
- o focales courtes : *f=1–5 m*
- o intensité: *a0≈10–10000*
- o contraste temporel très élévé

salle HE3 :APOLLON LASER

- o **f. laser 1: 15fs-qq ps/ 150J-70J**
- o **f. laser 2: 15fs-qq Ps/ 15J-2J**
- o f. non-compressé 200J-0J
- o f. sonde: 15fs 0.2-1J

salle HE0 : longues focales

- o **cibles gazeuses**
- o **focales longues : *f=10–20 m***
- o **intensité modérée: *a0≈1–10***
- o **bon contrast**

- o **accélération d'électrons**
  - o mono-étage et multi-étage
  - o régimes «bulle» et quasi-linear
- o **production de photons X**
  - o ondulateur plasma («betatron»)
  - o ondulateur magnétique avec 'seeding'
  - o diff. Thomson non-lin.; Compton inverse
- o **HHG** (sur cibles gazeuses)

Thèmes de Recherche

1) la LWFA est-elle utilisable pour construire des «vrais» accélérateurs?

2) Etude de la physique de l'accélération par onde plasma, pertinente aussi pour Plasma WFA (excitation / e-), PDWFA (excitation / protons)

Phasage du programme expérimental électrons

o **conception intégrée des dispositifs, des plus simples aux plus complexes, selon une approche système accélérateur,**
o **équipement résident et généraliste.**

- Phase 1a @ T0 (=2015):
  - bubble regime, 1 laser : 150J–70J, 15-150fs (+ probe 15fs, 0.2-1J)
  - homogeneous plasma, laser guiding by relativistic autofocussing , self injection
- Phase 1b @ T0+1y (=2016):
  - colliding pulse injection, cold injection
  - 2 laser beams : 100 mJ/[150-70J]
- Phase 2 @ T0+2y (=2017?):
  - two stage acceleration with all optical injector
  - 3 laser beams : 100mJ/6J/[10-100J]
- Phase 3a (>2019) (to be funded)
  - injection of e- beam into undulator (spontaneous emission as beam diagnostics)

exemple: Phase 2 (2017): accélération multi-étage « tout-optique»

Régime non-linéaire «bulle»

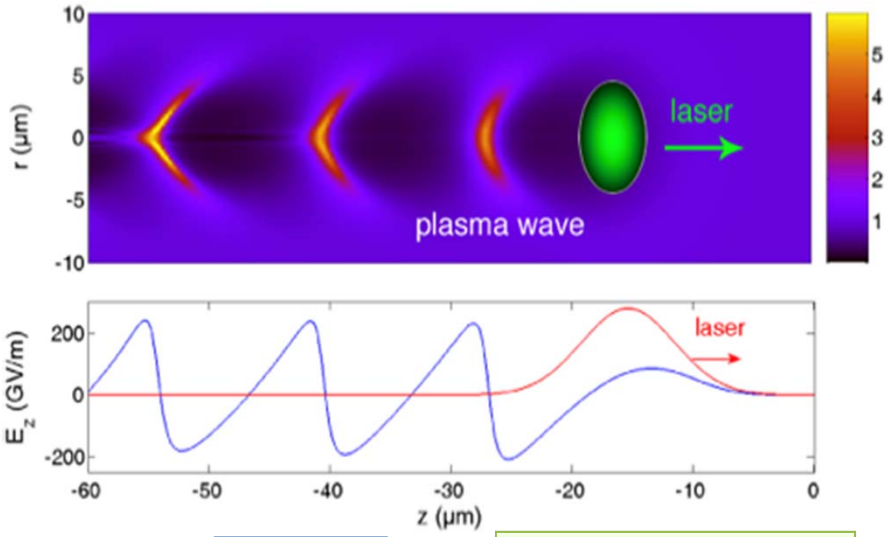
- déferlement -> génération paquet e^-
- champ accélérateur maximum, focalisation au pic du champ
- convient pour les e^- seulement.

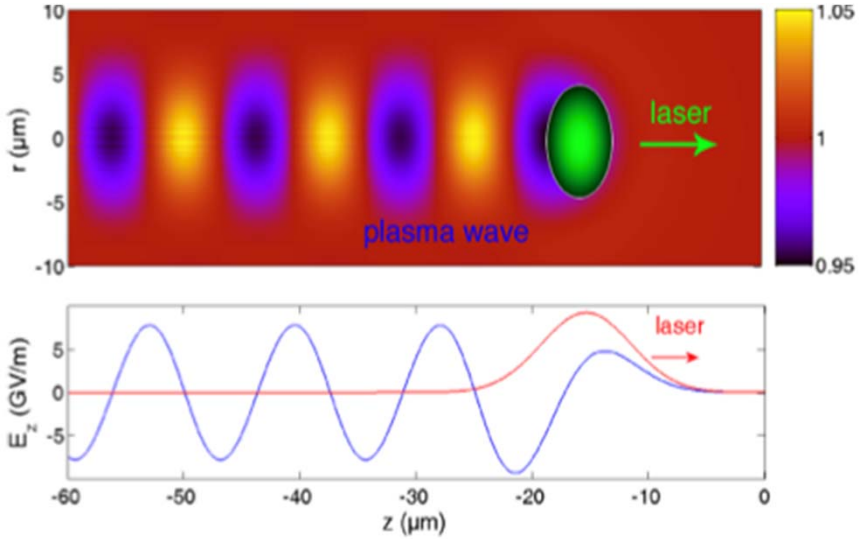
Régime quasi-linéaire :

Intensités laser (Wm^{-2}) plus faibles

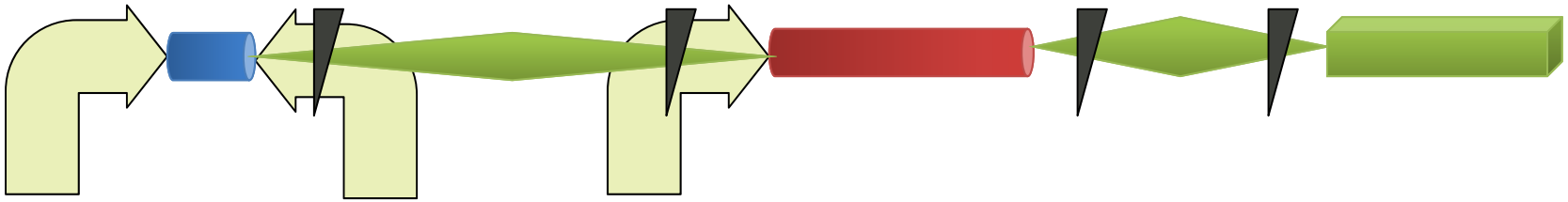
Amplification de l'onde plasma plus faible, champ accélérateur moindre

Convient pour e^+ et e^-, nécessaire à haut γ





LWFA | e^- transp. +diagn. | LWFA | e^- diagn. | e^- dump



Conclusions

- Les deux seuls projets techniquement réalistes pour cette décennie sont HL-LHC et ILC.

- Les projets de type 'LEP3', collisionneurs circulaires e+e-, sont d'une conception nouvelle et demanderont des démonstrateurs sur de très longue durée: anneau d'accumulation + anneau de collision, cryomodules CW.

- Le projet HE-LHC est basée sur une technologie d'aimant hybride futuriste avec 4 conducteurs supra dont trois n'ont jamais été éprouvés.

- Le projet CLIC reste au niveau de R&D et de démonstration de petite échelle malgré les ressources et efforts déployés par la collaboration CTF3 sur les structures accélératrices. L'accélération à deux faisceau pourrait être remise en cause.

- L'accélération LASER-Plasma vise la réalisation d'un projet à un étage d'accélération pour la prochaine décennie (CILEX).

- Ces conclusions intègrent ma conviction que les temps de développements et de consolidation de nouvelles technologies ou de nouveaux systèmes accélérateurs sont TRES longs, e.g. déjà 30 ans pour CLIC et pour Nb3Sn.

- Sur ces très longues durées, la 'pente' des performances est l'indicateur principal.