

Perspectives en cryogénie et supraconductivité à la frontière des hautes énergies

Philippe Lebrun
CERN

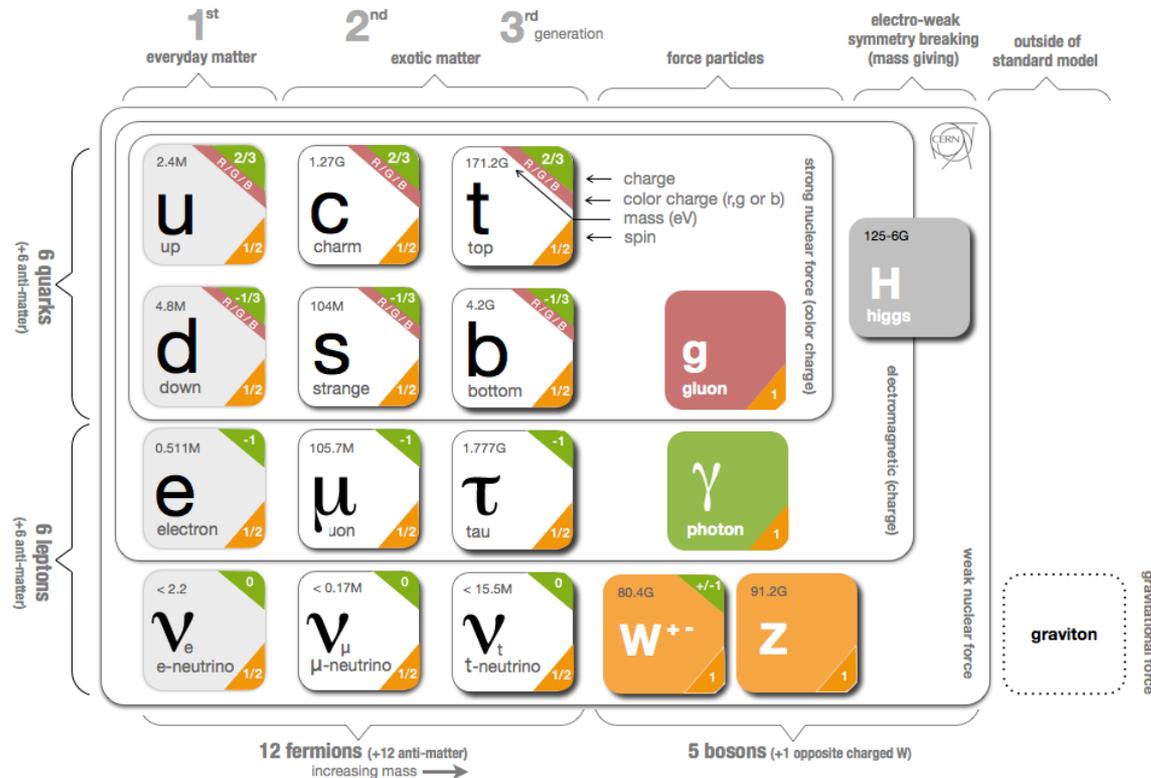
Journées Thématiques AFF-CCS «*LHC, premiers résultats et perspectives*»
CERN, 6-7 Juin 2013

Mise à jour de la stratégie européenne en physique des particules

Le processus

- Buts
 - Définir les objectifs prioritaires pour les années à venir
 - Préparer le futur à long terme de la discipline
- Processus périodique pluriannuel
 - Précédemment réalisé en 2006
- “Bottom-up”
 - Open symposium à Cracovie les 10-12 septembre 2012
 - 500 participants
 - 176 propositions écrites
- “Top-down”
 - Réunion de l’European Strategy Group à Erice les 21-25 janvier 2013
 - Production d’un document de travail soumis pour discussion au Conseil du CERN le 22 mars 2013
 - Document final approuvé lors d’une réunion spéciale du Conseil du CERN le 30 mai 2013 à Bruxelles

Le boson de Higgs vient compléter le Modèle Standard



- Cette description de la nature reste-t-elle valable $\gg 1$ TeV?
- Quelles modifications faut-il y apporter pour rendre compte d'observations inexplicées (asymétrie matière-antimatière, matière noire dans l'univers, inflation cosmologique, gravité quantique)?

Mise à jour de la stratégie européenne en physique des particules

Les résultats

- Aspects généraux

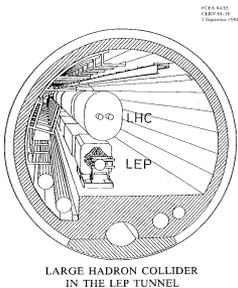
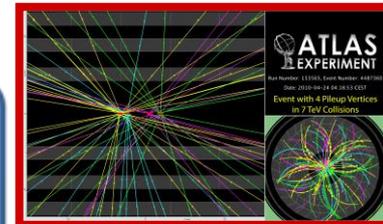
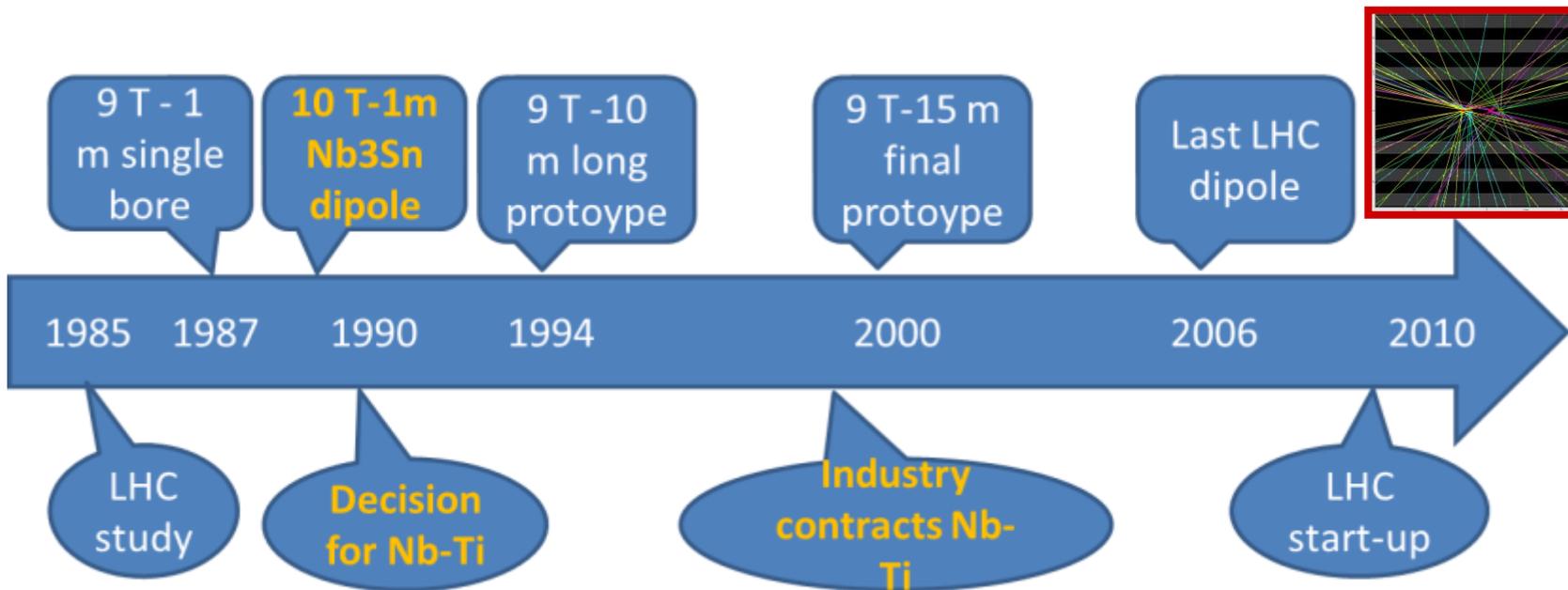
- Réaffirmation du modèle européen basé sur le CERN, la planification à long terme, la stabilité du financement et l'engagement des Etats Membres
- Taille croissante des grands équipements et globalisation de la discipline

- Premières priorités

- Exploitation complète du potentiel du LHC \Rightarrow HL-LHC
- Futurs projets d'accélérateurs à la frontière des hautes énergies
 - Collisions proton-proton > 1 TeV \Rightarrow HE-LHC, VHE-LHC (circulaires)
 - Collisions électron-positon > 1 TeV \Rightarrow CLIC (linéaire)
 - R&D associées: aimants haut champ, structures accélératrices haut gradient
- Mesures de précision du boson de Higgs
 - Collisions électron-positon < 1 TeV \Rightarrow ILC (linéaire), TLEP (circulaire)
- Oscillations de neutrinos
 - Violation de CP et hiérarchie des masses: projet à «longue base» \Rightarrow accélérateur à protons à haute intensité (cavités RF supraconductrices)

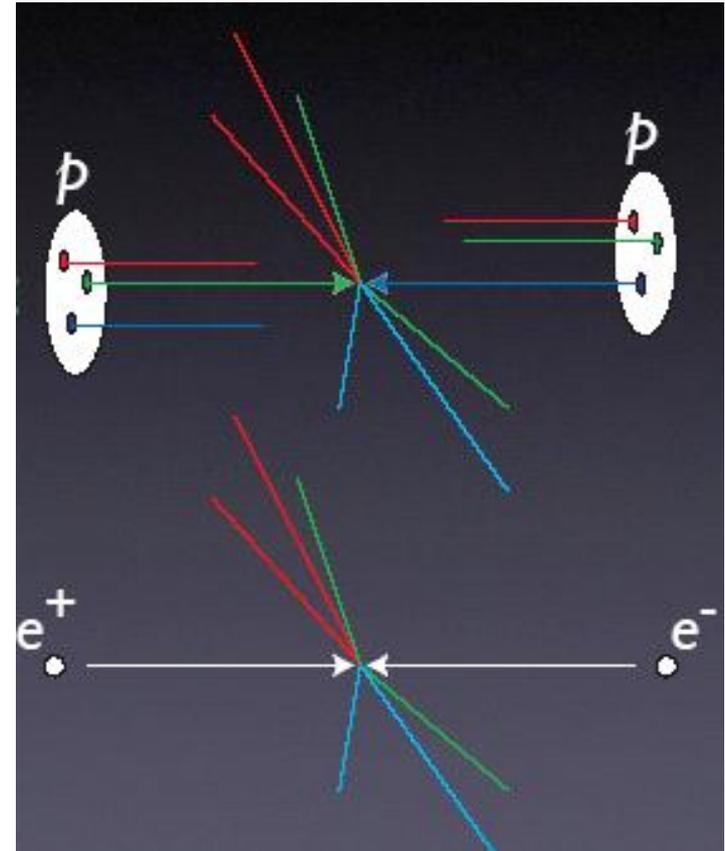
Pourquoi s'en préoccuper maintenant?

Souvenons-nous de la longue gestation du LHC



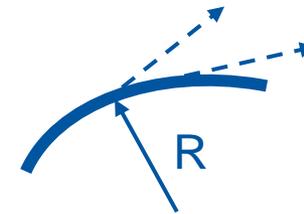
Proton-proton ou électron-positon ?

- On accélère des faisceaux de particules stables et chargées
 - Protons (antiprotons)
 - Electrons (positons)
- Les électrons sont des particules élémentaires, les protons sont composites
- Les collisions d'électrons ont un état initial entièrement défini en
 - Énergie
 - Moment angulaire
- Toute l'énergie incidente est utilisée dans la collision ponctuelle



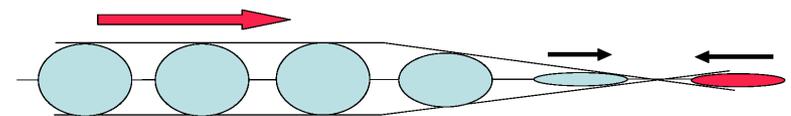
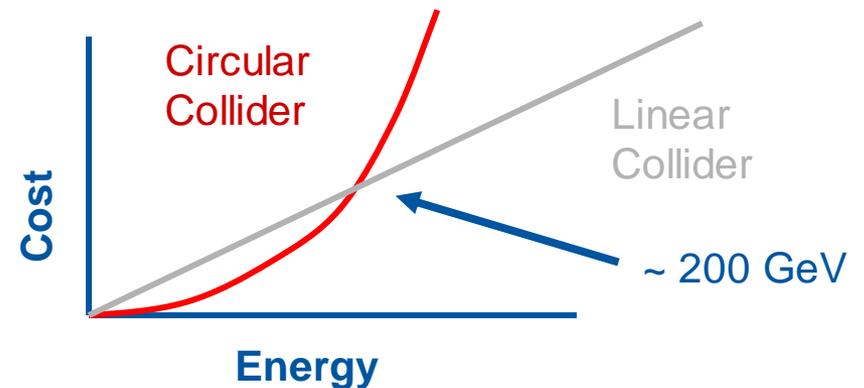
Collisionneur circulaire ou linéaire ?

- Le rayonnement synchrotron, limitation fondamentale pour les électrons à haute énergie
 - Grand rayon de courbure
 - Linéaire
- Différentes lois d'échelle du coût des grands accélérateurs
 - Break-even ~ 200 GeV
- Les accélérateurs linéaires voient un seul passage du faisceau
 - Faible efficacité énergétique
 - Faisceau à très faible émittance et grande intensité
 - Contenir la dégradation de l'émittance: stabilité, alignement
 - Focaliser les faisceaux au point de collision



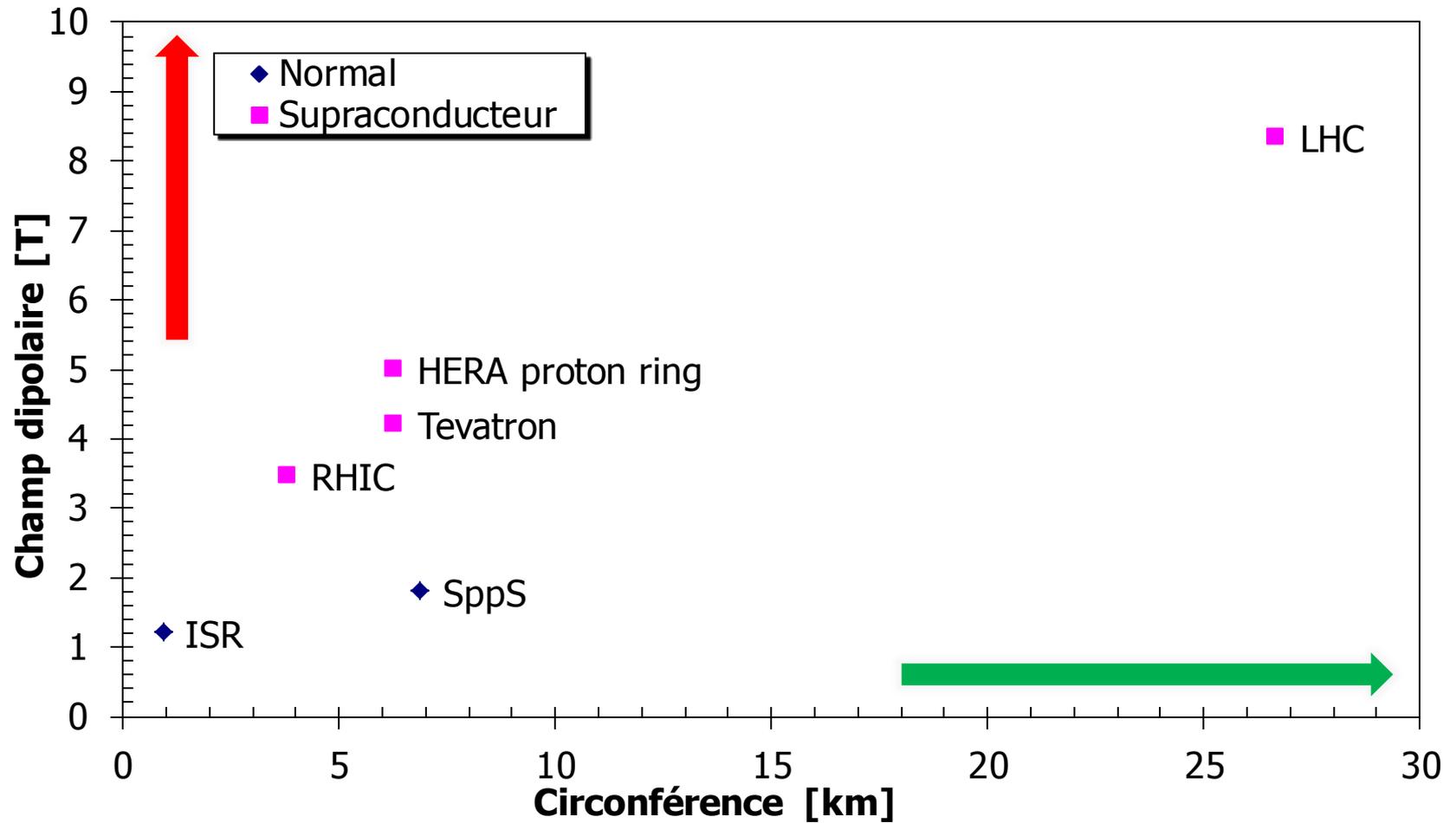
Synchrotron Radiation

$$\Delta E \sim (E^4 / m^4 R)$$

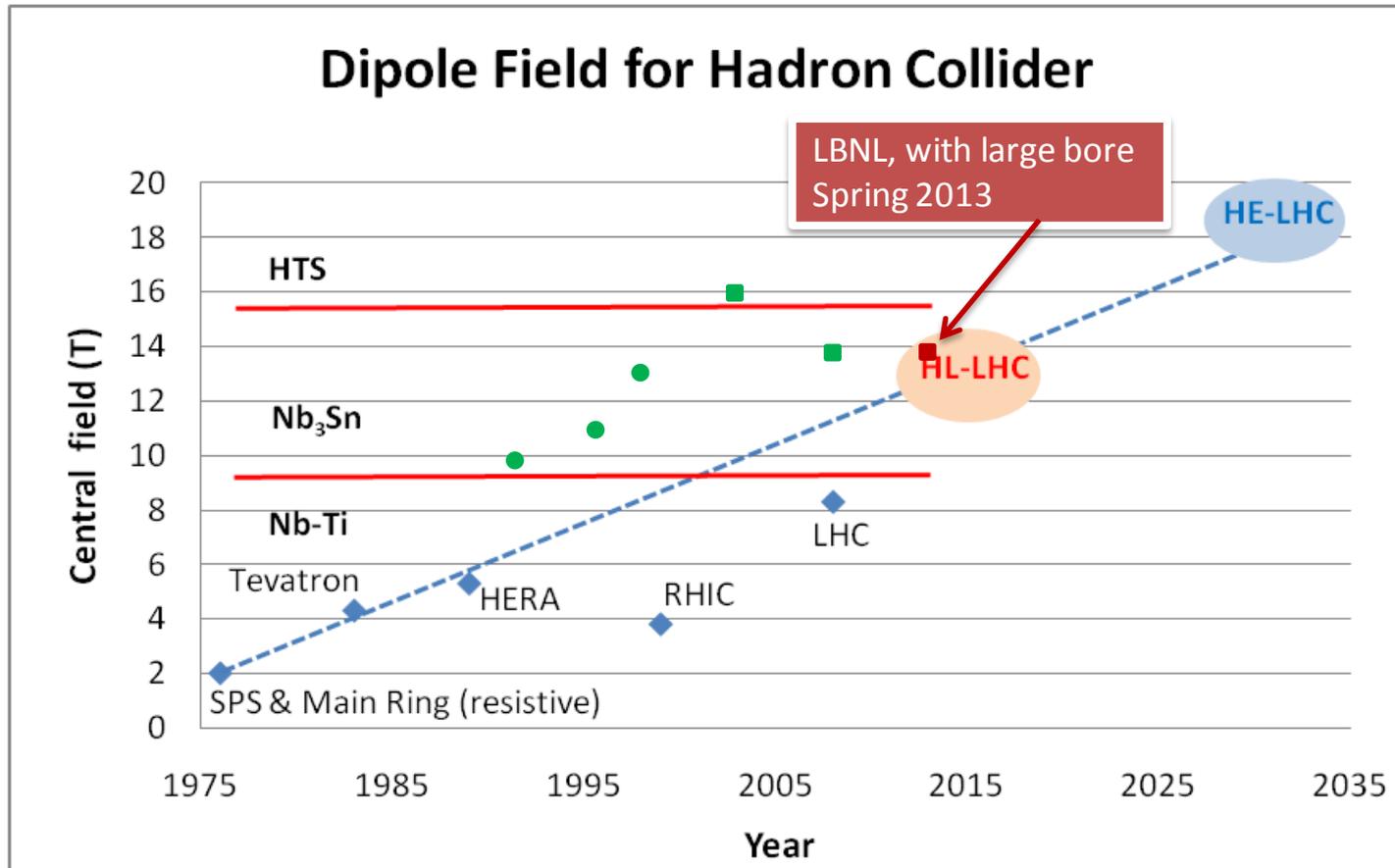


p p

Axes de développement des collisionneurs de hadrons



Premier ingrédient: des aimants à champ très élevé



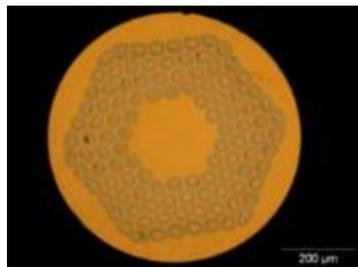
◆ Nb-Ti operating dipoles ● Nb₃Sn cos θ test dipoles ■ Nb₃Sn block test dipoles

L. Rossi

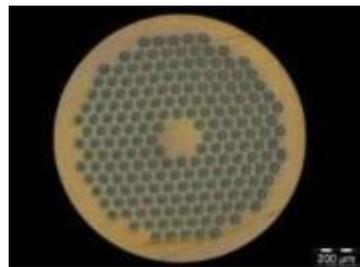
Supraconducteurs à haute performance

Nb₃Sn

- Aimants de RMN ~ 20 t/an
- ITER ~ 500 t
- Aimants d'accélérateur
 - «Etain interne»
 - Haut J_c (3 x ITER)
 - Filaments 50 mm ⇒ pertes
 - Coût ~ 5 x Nb-Ti



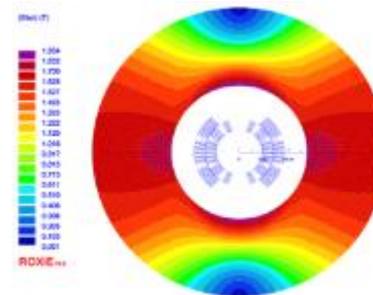
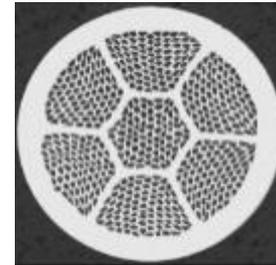
Fil 0.7 mm RRP
Oxford OST



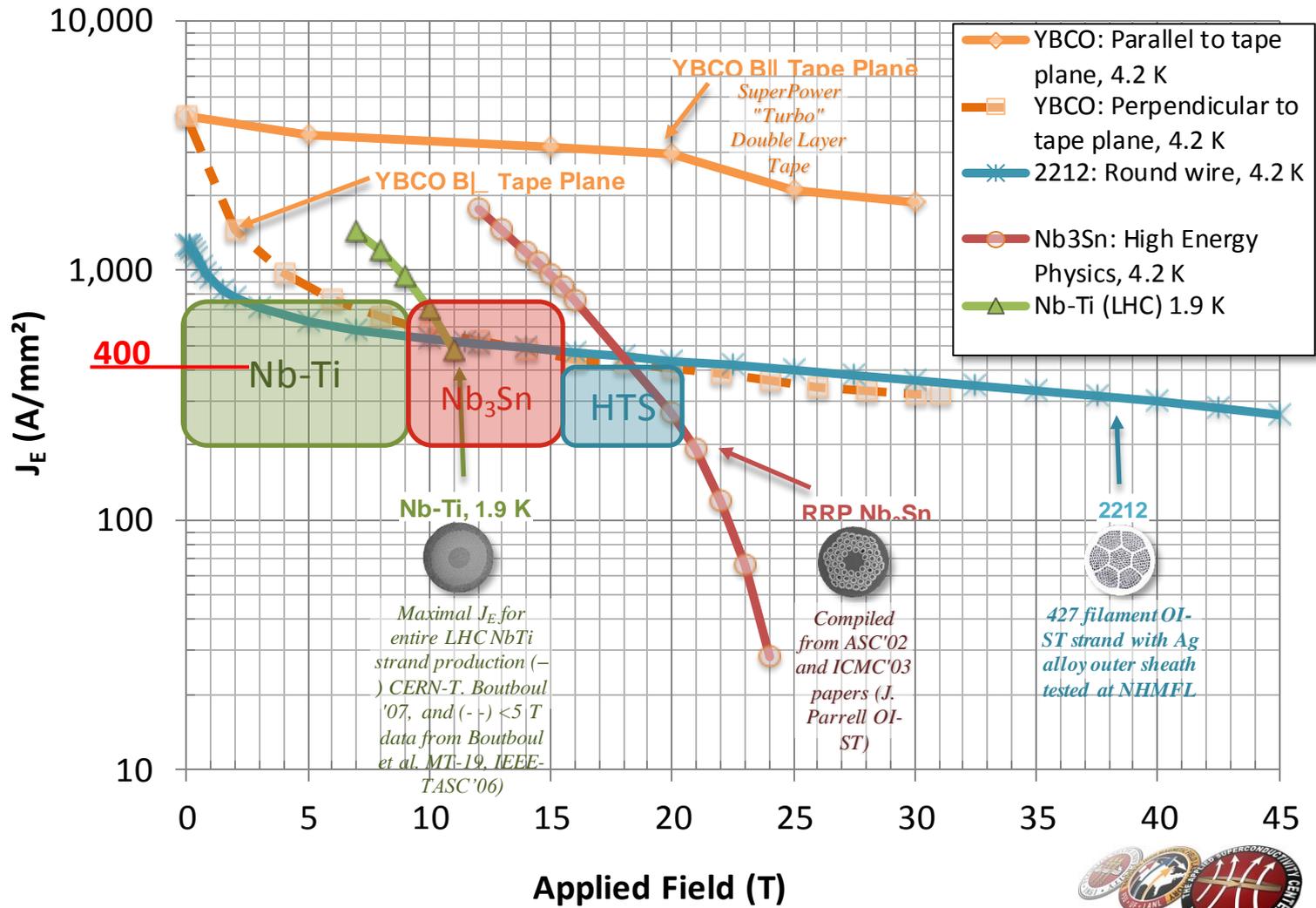
Fil 1mm PIT
Bruker EAS

HTS

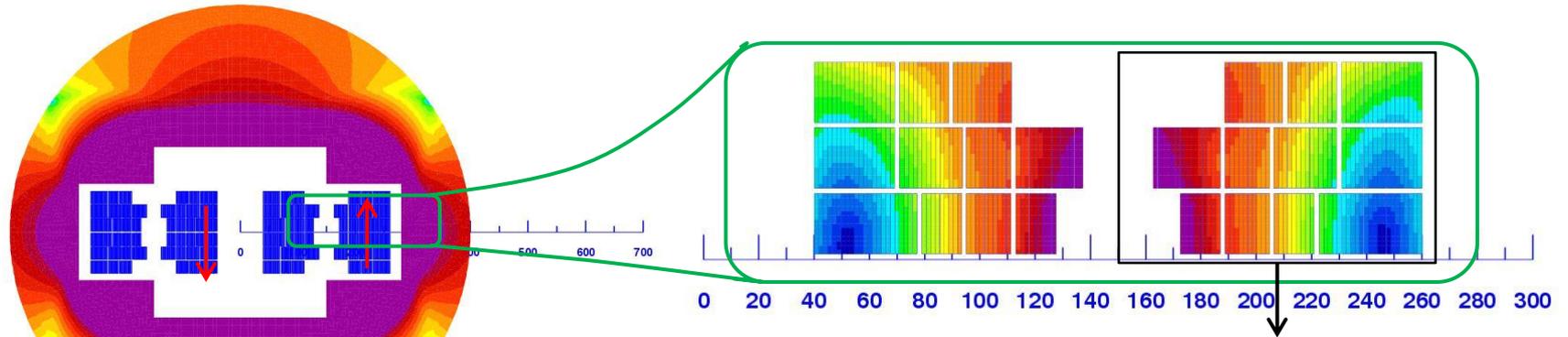
- Activité FP7/EUCARD2
 - développement de câbles 10 kA pour aimants d'accélérateurs
 - Bi-2212 & YBCO
 - Validation sur un dipôle d'accélérateur 5 T



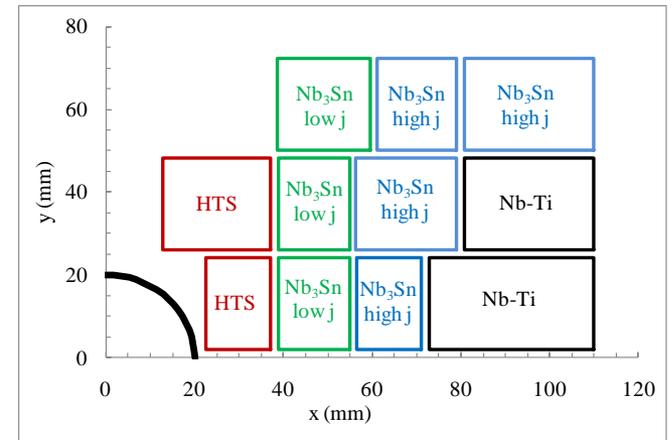
Optimiser l'utilisation des supraconducteurs



Conception préliminaire d'un dipole 20 T

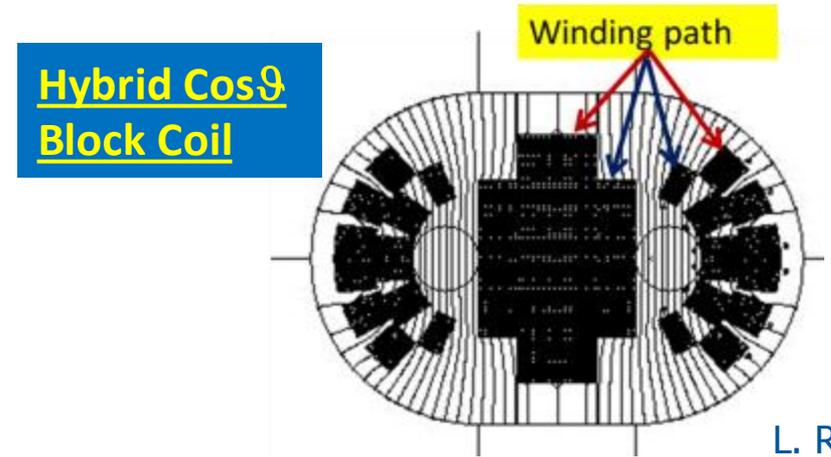
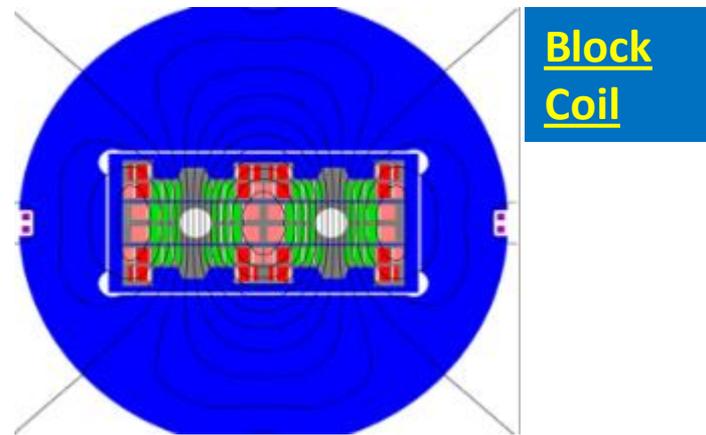
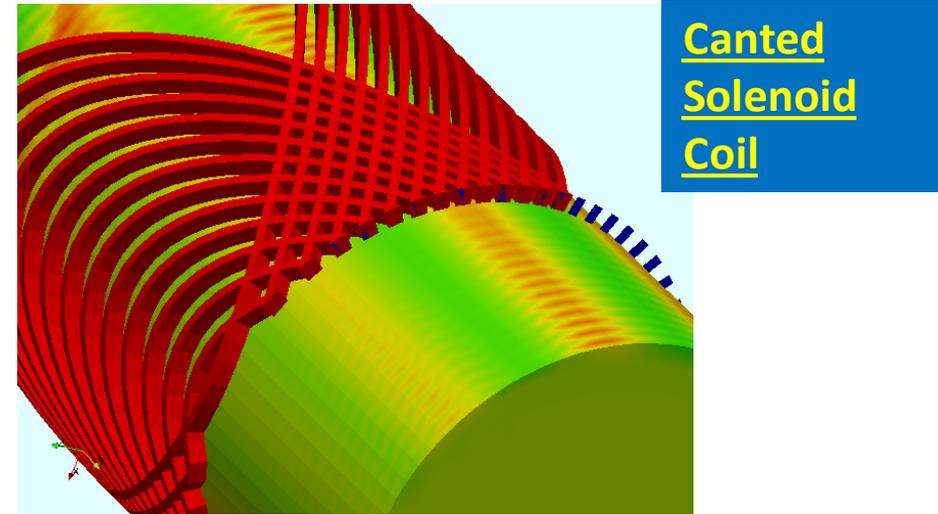
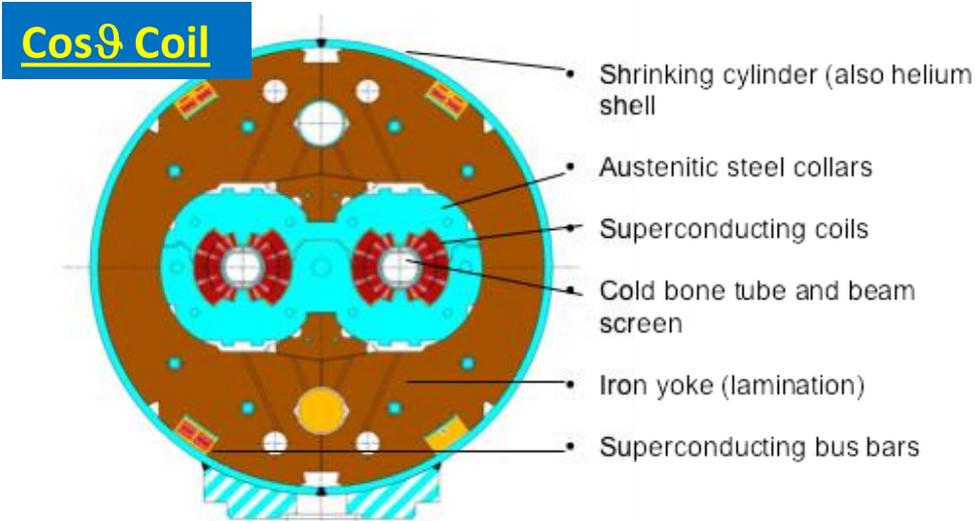


Material	N. turns	Coil fraction	Peak field	$J_{\text{overall}} \text{ (A/mm}^2\text{)}$
Nb-Ti	41	27%	8	380
Nb ₃ Sn (high J _c)	55	37%	13	380
Nb ₃ Sn (Low J _c)	30	20%	15	190
HTS	24	16%	20.5	380



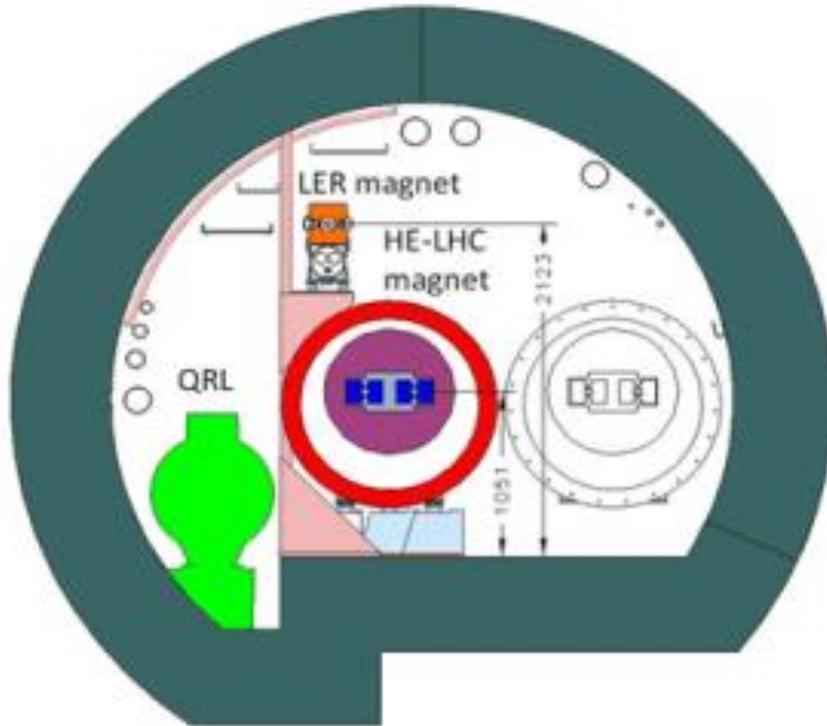
L. Rossi & E. Todesco

Configurations dipolaires possibles



L. Rossi

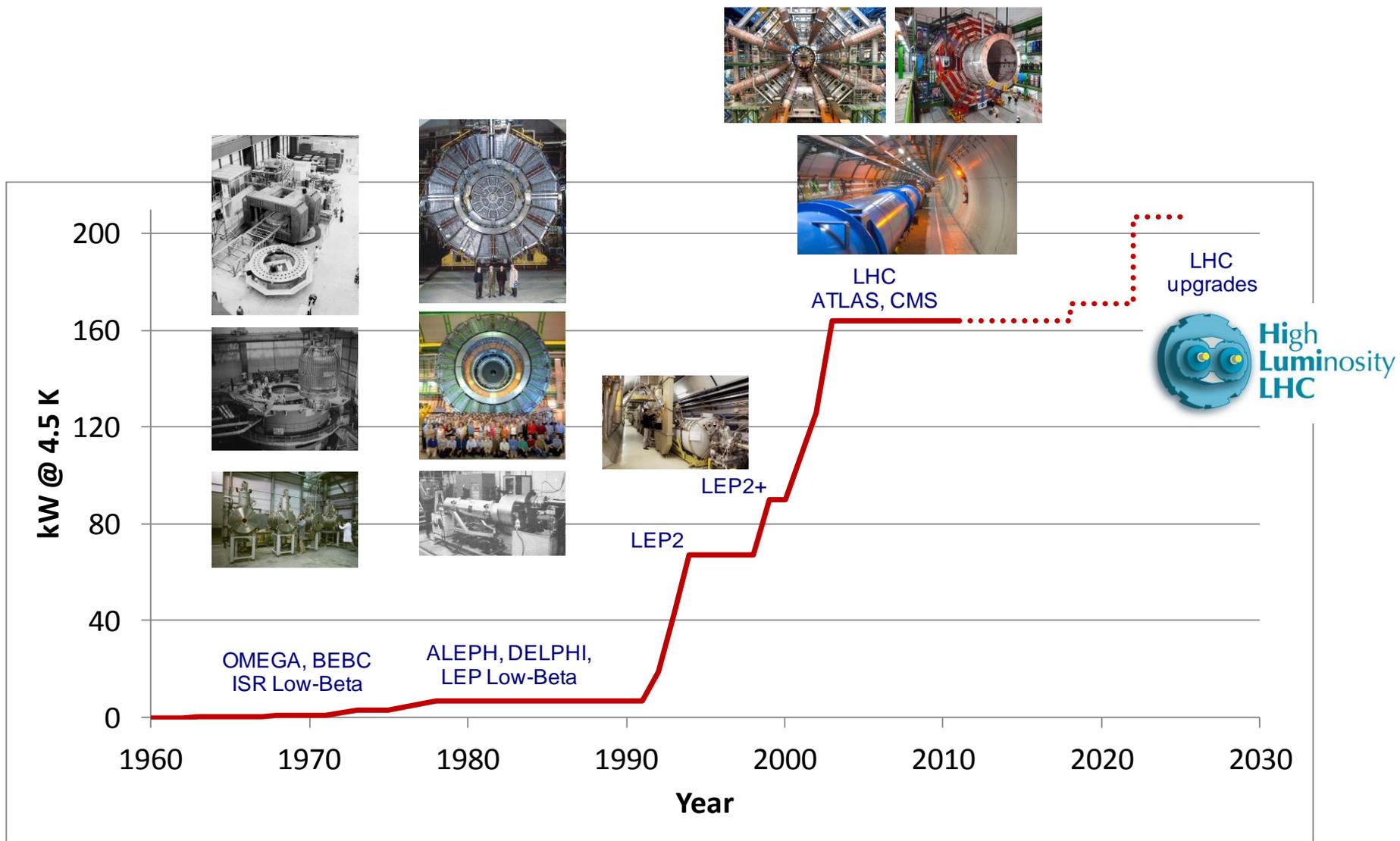
De nouveaux aimants dans le même tunnel: HE-LHC



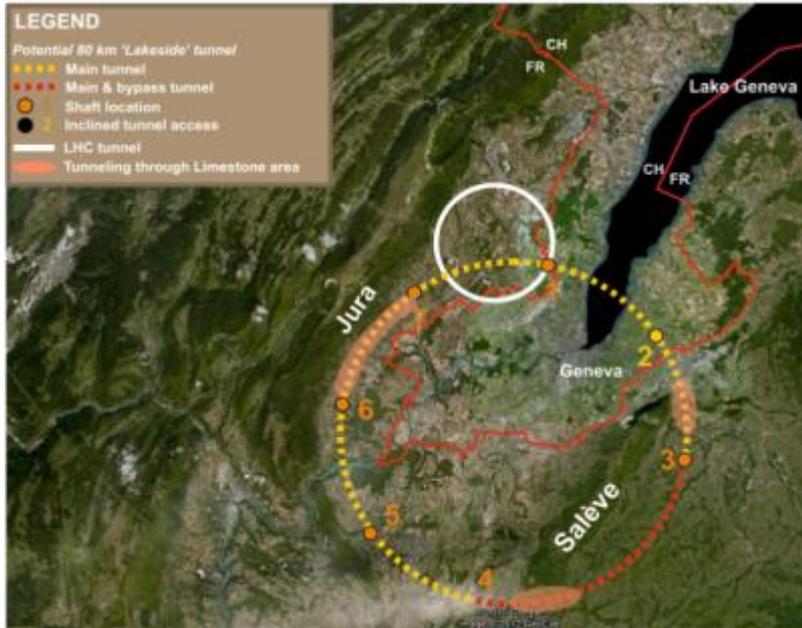
- 2000 aimants principaux de 15 à 20 T
 - 1000 t de Nb-Ti
 - 1500 t de Nb₃Sn
 - 500 t de HTS
 - 100 t de SC pour câbles électriques
- Réutilisation des infrastructures
 - Génie civil
 - Cryogénie
- Injecteur > 1 TeV
 - SC SPS ou LER?

L. Rossi

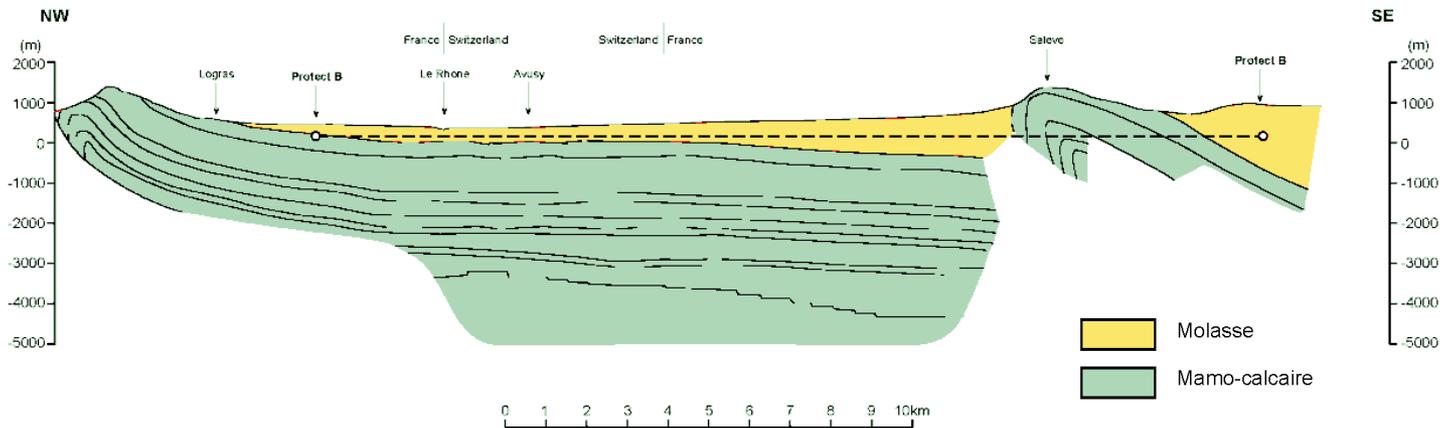
HE-LHC réutilisera la cryogénie existante et ses améliorations



Second ingrédient: un grand tunnel circulaire (80 km)



- Horizons géologiques traversés
 - Moraines
 - Molasse
 - Calcaires (Jura & Salève)
- Profondeur > 140 m
- Impacts environnementaux
 - Aquifères
 - Zones urbanisées
 - Puits vs rampes d'accès

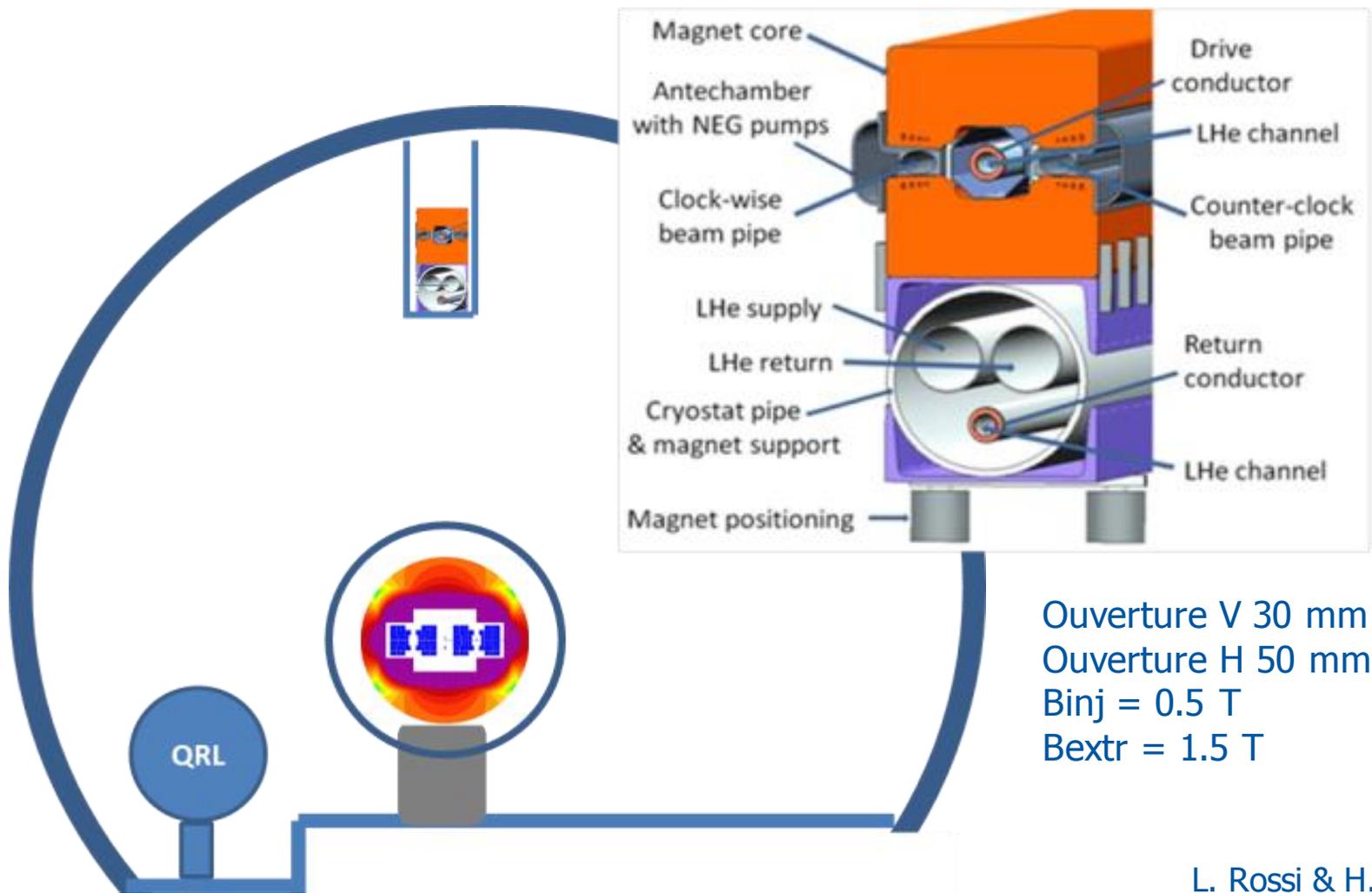


J. Osborne

Paramètres comparés des collisionneurs p p

	LHC	HE-LHC	VHE-LHC
Energie de collision [TeV]	14	33	100
Circonférence [km]	26.7	26.7	80
Champ dipolaire [T]	8.33	20	20
Diamètre intérieur des bobines [mm]	56	40	40
Energie d'injection [TeV]	0.45	>1	>3
Intensité de faisceau [A]	0.58	0.41	0.40
Energie stockée par faisceau [MJ]	362	601	5410
Puissance synchrotron par faisceau [kW]	3.6	82.5	2360
Puissance synchrotron linéique [W/m]	0.21	3.5	33
Nombre d'évènements par croisement	19	190	190
Luminosité [$E+34 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	1.0	5.0	5.0
Durée de vie des faisceaux [h]	45	6.3	18.6

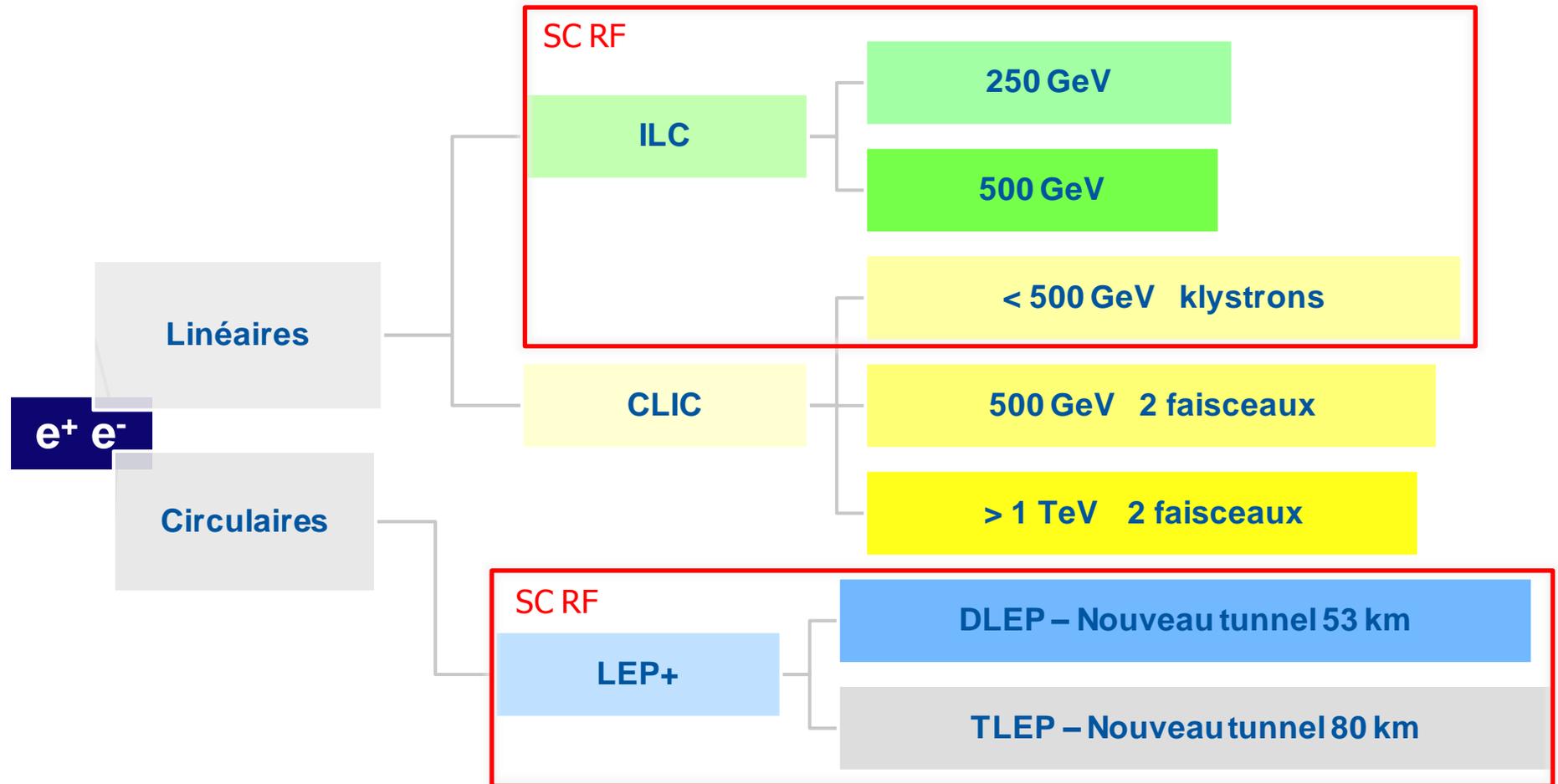
Un grand anneau à bas champ comme injecteur? Aimants superferriques excités par une ligne supraconductrice



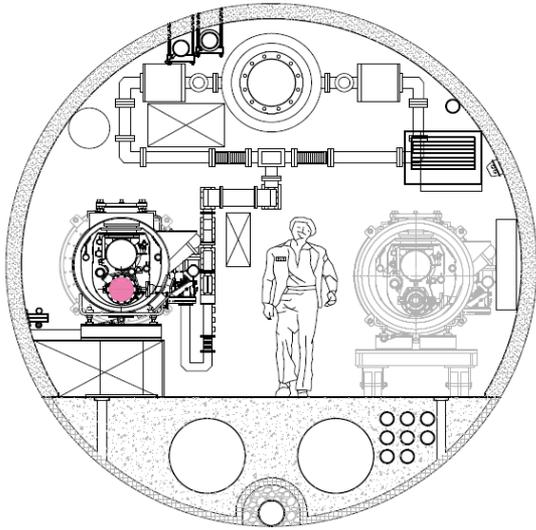
L. Rossi & H. Piekarz

$e^+ e^-$

Collisionneurs e+ e- à l'étude



International Linear Collider



Collisionneur linéaire $e^+ e^-$

Energie de collision 500 GeV, upgrade ~ 1 TeV

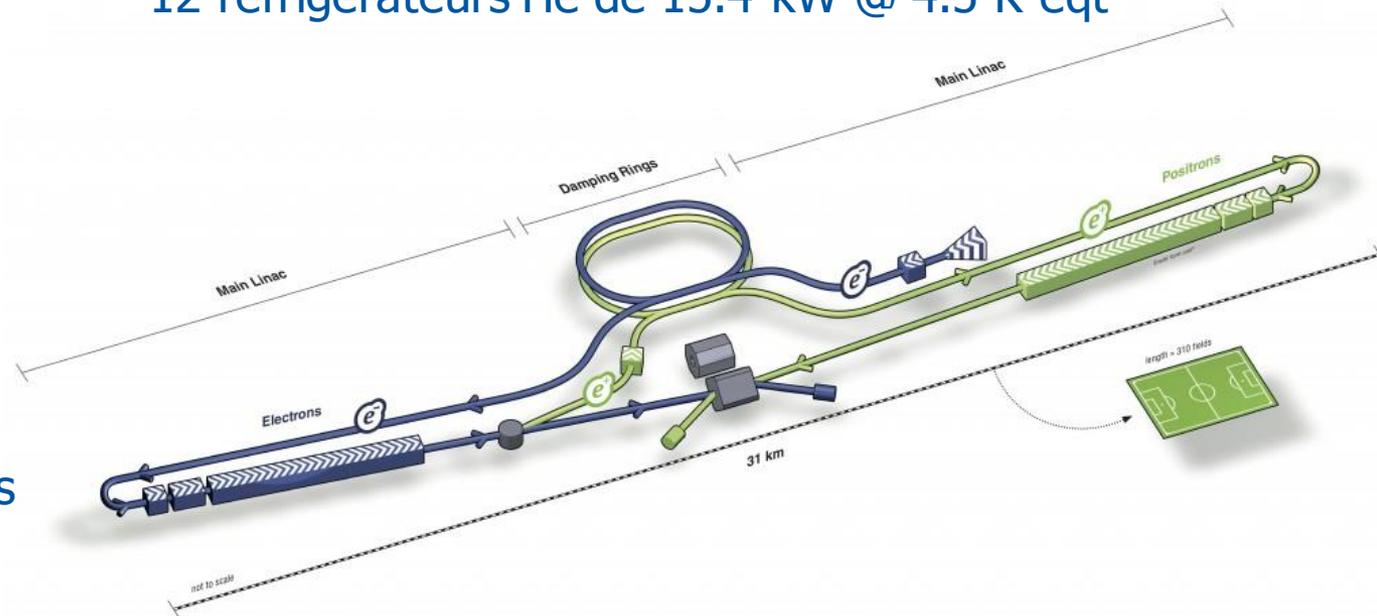
Longueur totale 31 km

18'000 cavités RF SC 1.3 GHz en Nb à 2 K

1750 cryomodules

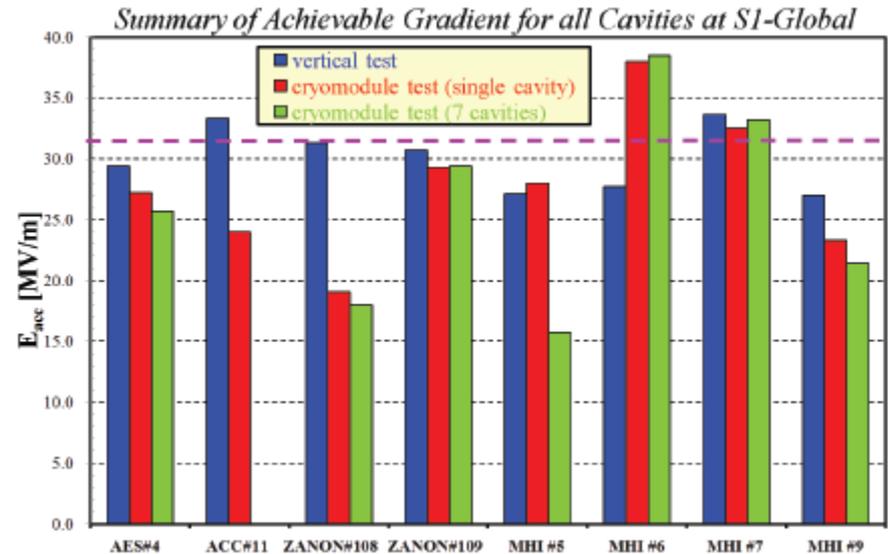
12 réfrigérateurs He de 15.4 kW @ 4.5 K eqt

Global Design Effort
Collaboration mondiale
Etudes d'implantation
sur des sites spécifiques



ILC cavités et cryomodules

Gradient nominal moyen 31.5 MV/m



(a) PXFEL1 at DESY

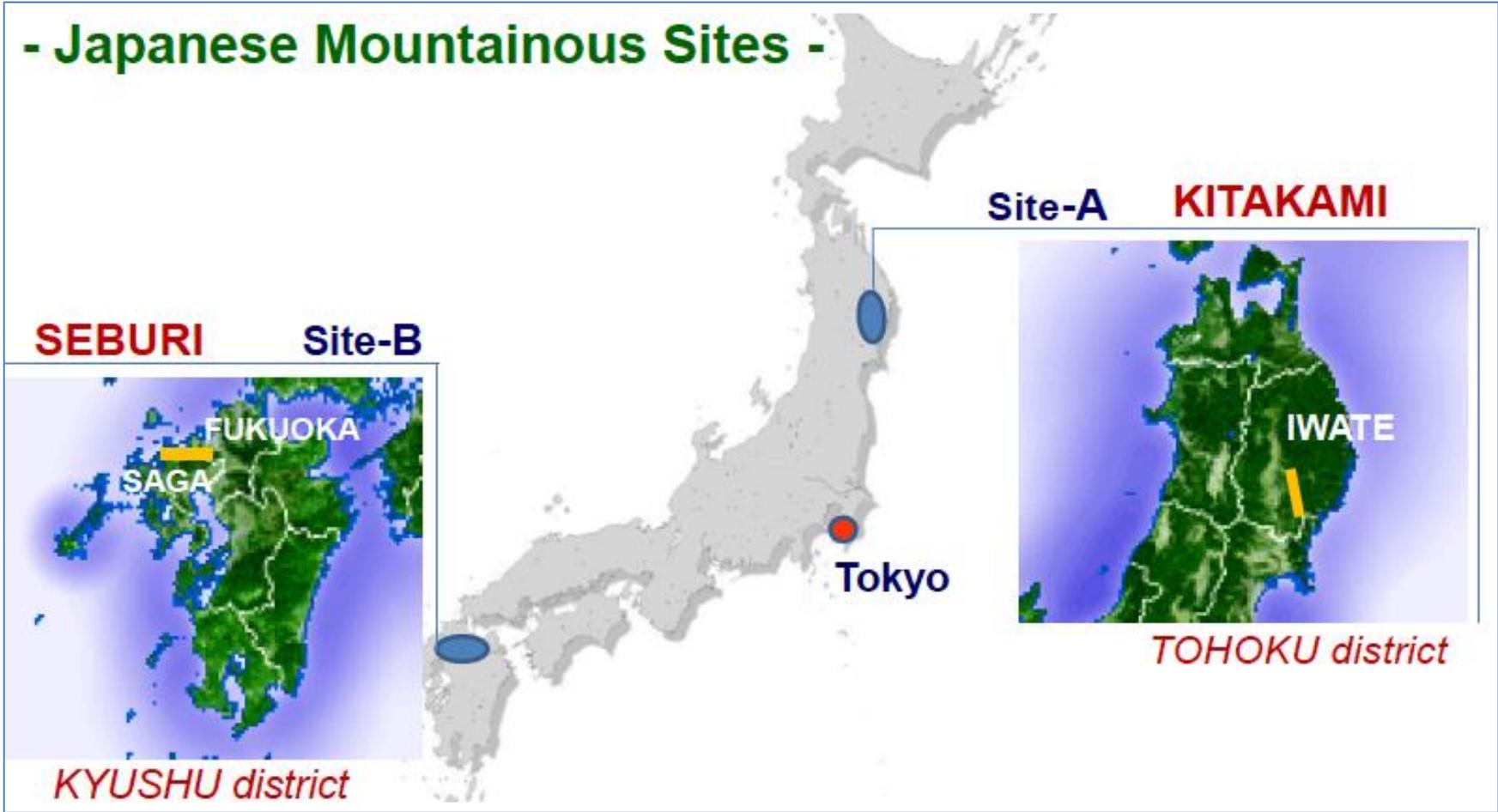


(b) CM2 at FNAL



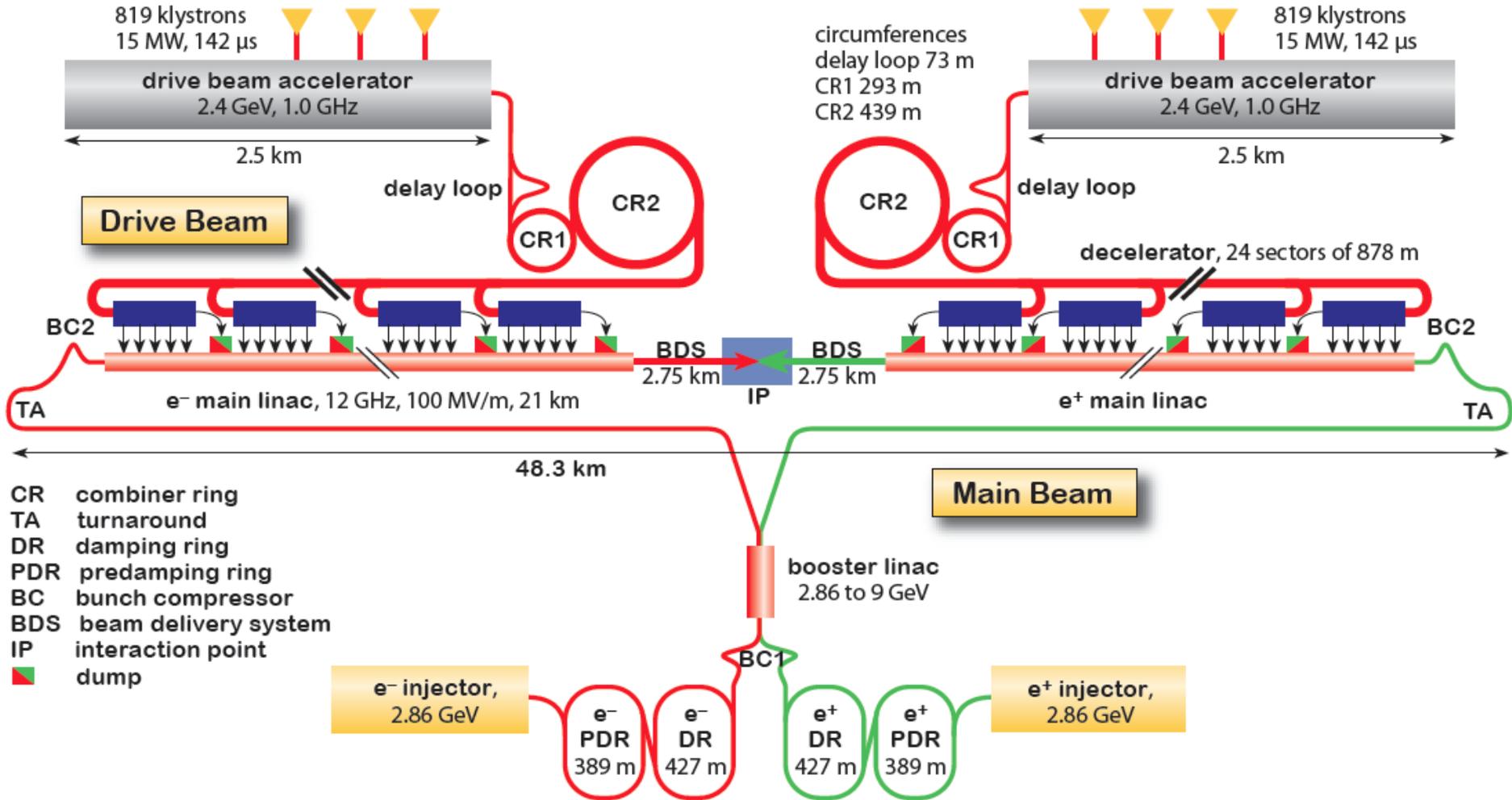
(c) S1-Global at KEK

Sites possibles pour l'ILC au Japon



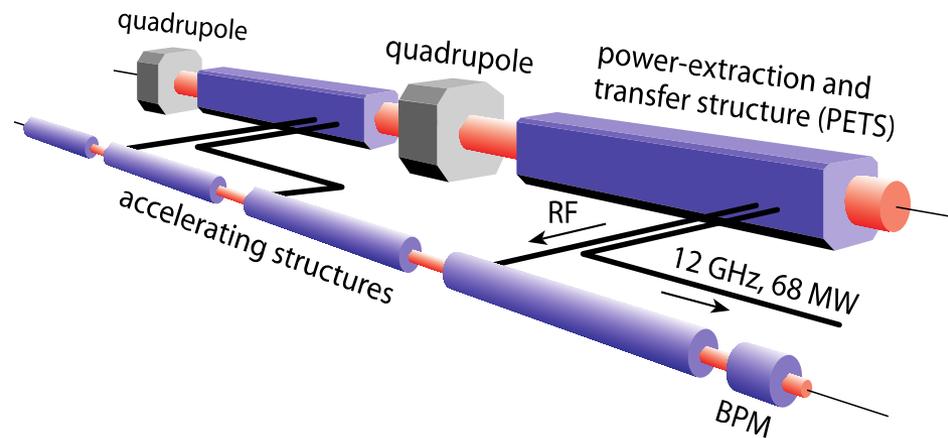
Compact Linear Collider CLIC

Energie de collision max 3 TeV



CLIC linac à 2 faisceaux

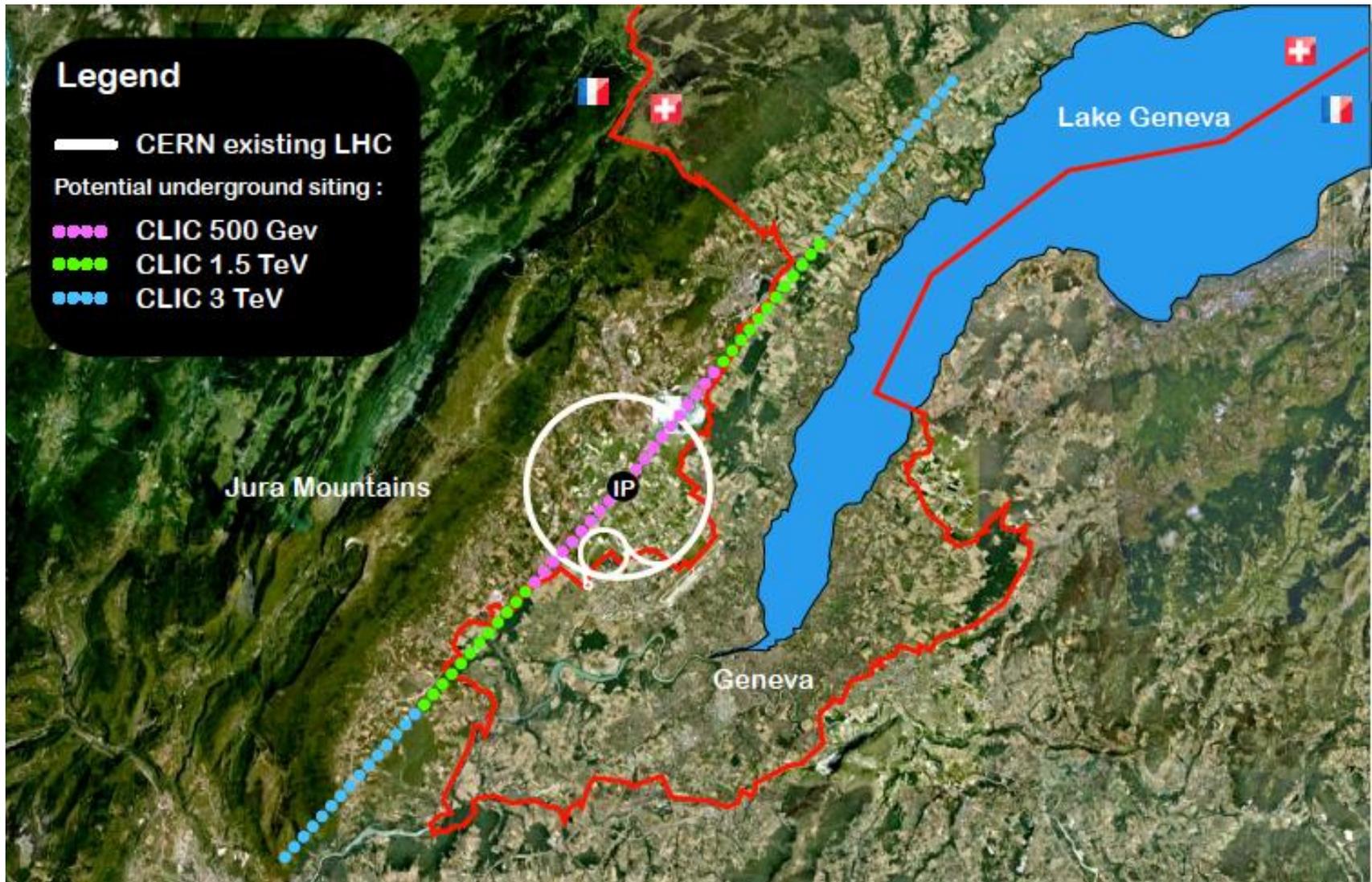
Gradient accélérateur 100 MV/m, structures RF en cuivre



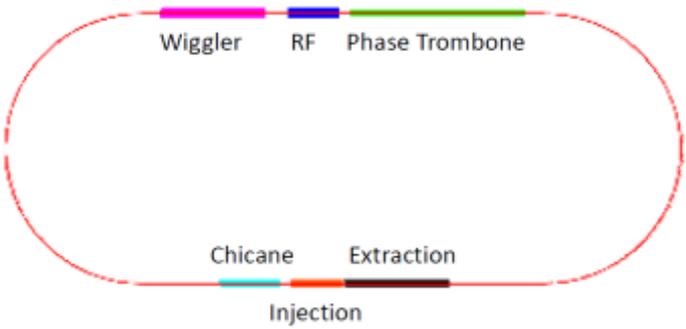
Installation de test CTF3



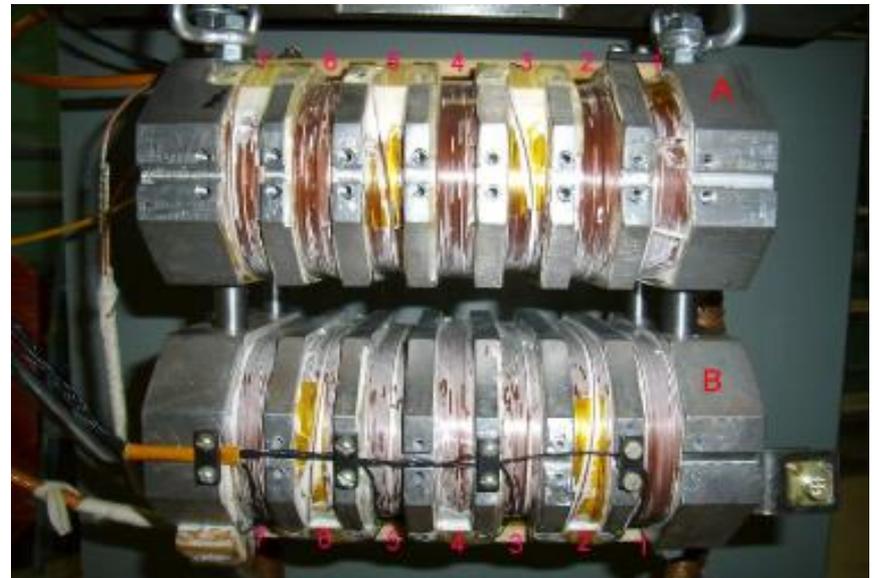
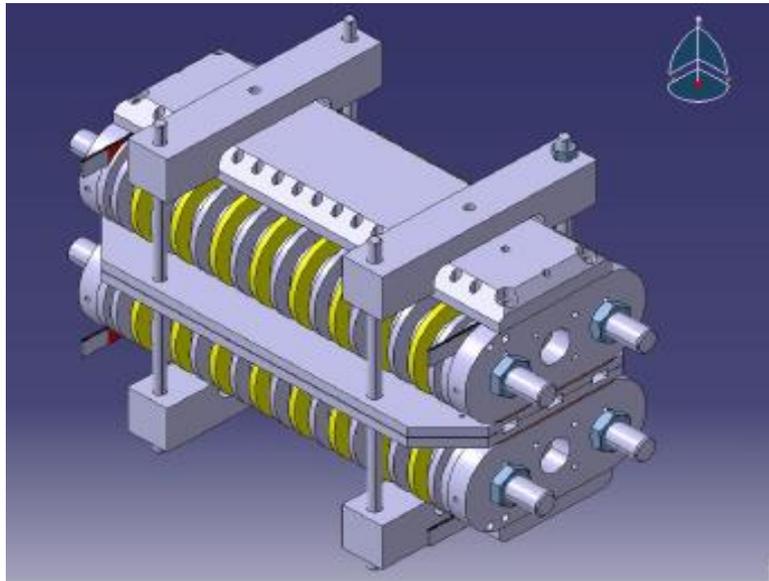
Implantation possible de CLIC au CERN



104 wigglers SC pour les anneaux d'amortissement de CLIC



	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	Nb-Ti	Nb-Ti
Period Length λ [mm]	40	50	50	50
Gap (beam stay clear) [mm]	13	13	13	13
Gap (magnetic) [mm]	18	18	18-20	18-20
Mid plane field [T]	2.5	3.7	2.5	3.0
Peak Field [T]	7.9	10.5	6.2	7.5
Operating Current [A]	1100	1000	660	790
Inductance at operating current [H]	0.5	1.5	1.5	1.5
Operating temperature [K]	~5	~5	4.3	1.9



Défis techniques des grands collisionneurs circulaires e+ e-

Rayonnement synchrotron

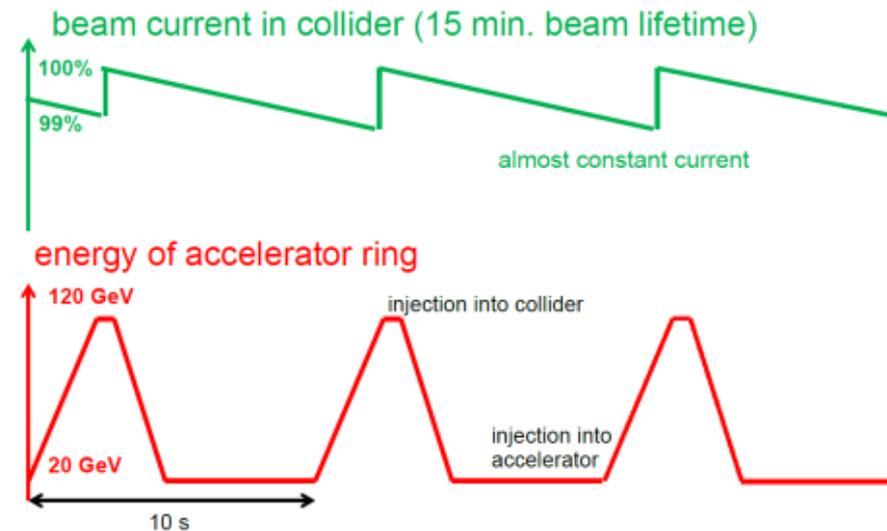
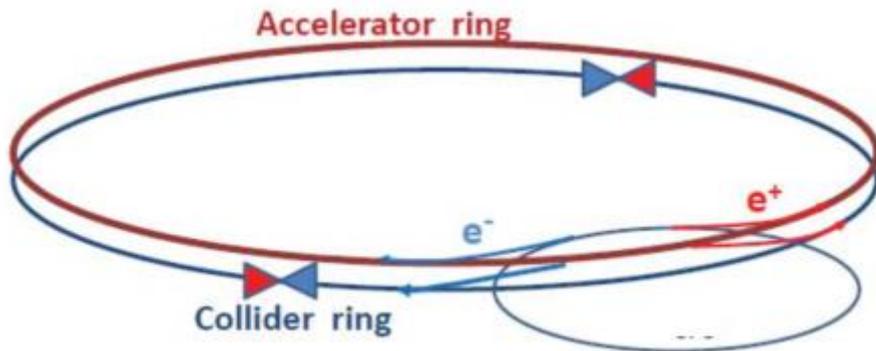
$$P_{SR} = \frac{ec}{6\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\gamma^4}{\rho^2} \cdot \frac{I_b}{f_{rev}}$$

Energie du faisceau

Intensité du faisceau

Rayon de courbure

«Consommation» des faisceaux



Paramètres comparés des collisionneurs circulaires e+ e-

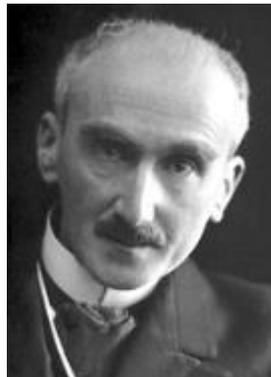
	LEP2	TLEP
Energie de collision [GeV]	209	350
Circonférence [km]	26.7	80
Perte d'énergie par tour [GeV]	3.4	9.3
Intensité de faisceau [mA]	5	5.4
Puissance synchrotron par faisceau [MW]	11	50
Energie critique synchrotron [MeV]	0.81	1.32
Fréquence RF [MHz]	352	704
Champ accélérateur total [GV]	3.6	12
Gradient accélérateur [MV/m]	6	20
Luminosité [$10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	1.25	65
Nombre de cavités	288	567
Température de fonctionnement [K]	4.5	2
Puissance cryogénique [kW @ T]	72 @ 4.5 K	40? @ 2 K

Conclusion

- La stratégie européenne en physique des particules, qui vient d'être adoptée, repose principalement sur l'exploitation complète du LHC, y compris l'amélioration de ses performances, et sur la possibilité d'une nouvelle génération d'accélérateurs au-delà de 2030
- Les choix de construction de futurs projets seront, comme il se doit, dictés par les découvertes de la physique d'ici la fin de la décennie
- Les études de ces futurs projets doivent être couplées à un vigoureux programme de R&D incluant les aimants à champ élevé et les structures accélératrices à fort gradient, conduit en collaboration avec les instituts nationaux, les laboratoires et les universités
- La supraconductivité et la cryogénie restent des technologies clés pour la plupart des futurs projets d'accélérateurs de particules à la frontière des hautes énergies



“La spéculation est un luxe, tandis que l’action est une nécessité”



Henri Bergson

L'évolution créatrice (1907)

