

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Statut de l'optique du futur collisionneur à hadrons FCC-hh

Antoine CHANCE
au nom de la collaboration sur la machine
FCC-hh

CEA/DRF/IRFU/DACM

Journées accélérateurs 2019 de la SFP
3 Octobre 2019



The European Circular Energy-Frontier Collider Study (EuroCirCol) project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant No 654305. The information herein only reflects the views of its authors and the European Commission is not responsible for any use that may be made of the information.



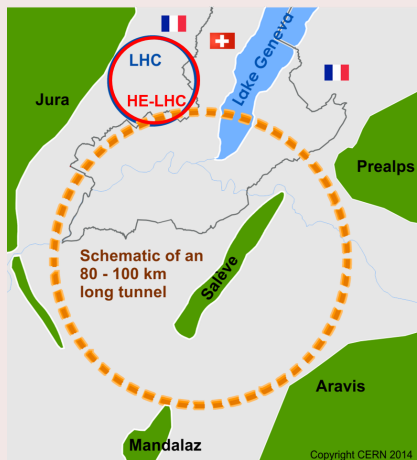
- ▶ Découverte du Higgs
- ▶ Le modèle standard est confirmé.
- ▶ Questions toujours non élucidées:
 - ▶ Masse du neutrino
 - ▶ Asymétrie matière/antimatière
 - ▶ Matière noire
 - ▶ Nouvelle physique: supersymétrie...



Stratégie européenne pour la physique des particules (pour 2018).

*To stay at the forefront of particle physics, Europe needs to be in a position to **propose an ambitious post-LHC accelerator** project at CERN **by the time of the next Strategy update**, when physics results from the LHC running at 14 TeV will be available. CERN should **undertake design studies** for accelerator projects in a global context, with emphasis on proton-proton and electron-positron **high-energy frontier machines**. These design studies should be **coupled to a vigorous accelerator R&D program**, including high-field magnets and high-gradient accelerating structures, in collaboration with national institutes, laboratories and universities worldwide.*

100 TeV c.m. 100 km



Proton-proton: FCC-hh

- ▶ Définit les infrastructures.
- ▶ A l'horizon 2045.
- ▶ **Raison d'être de FCC.**
- ▶ Nouvelle physique.
- ▶ Utilisation d'ions optionnelle.

Électron-positron: FCC-ee

- ▶ Étape intermédiaire possible.
- ▶ Précision sur le Higgs et décroissances rares de Z, W, H et t.

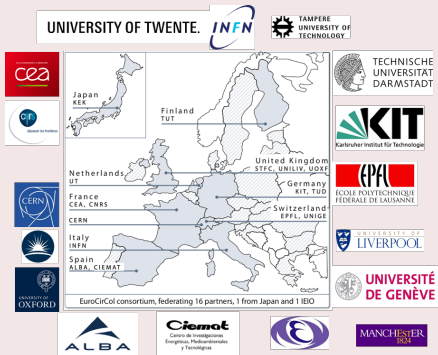
Proton-électron: FCC-he

- ▶ Optionnel.
- ▶ Diffusion inélastique et physique Higgs.

Alternative: HE-LHC

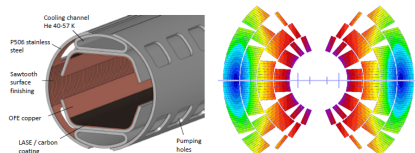
- ▶ Utilise la technologie de FCC-hh.

EuroCirCol: 2015-2019



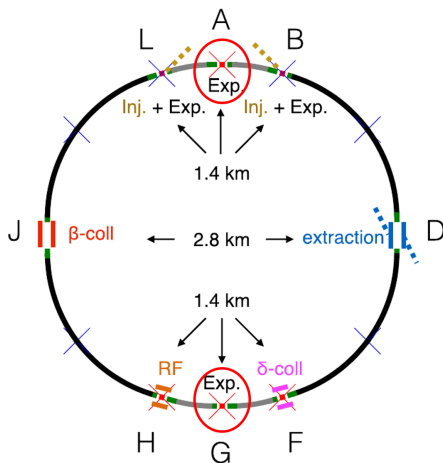
- ▶ Participation du CEA et CNRS sur **optique des arcs, collimation et aimants**.
- ▶ Données d'entrée pour la Stratégie européenne pour la physique des particules.

- ▶ 15 partenaires
- ▶ Points clés:
 - ▶ Faisabilité de l'optique (arcs et régions d'interaction).
 - ▶ Optimisation du tube faisceau (impédance, traitement de surface, electron cloud, vide ...).
 - ▶ Dipôles de 16 T
 - ▶ Modèle de coût.
- voir C. Lorin "aimants Nb₃Sn pour FCC et HE-LHC"

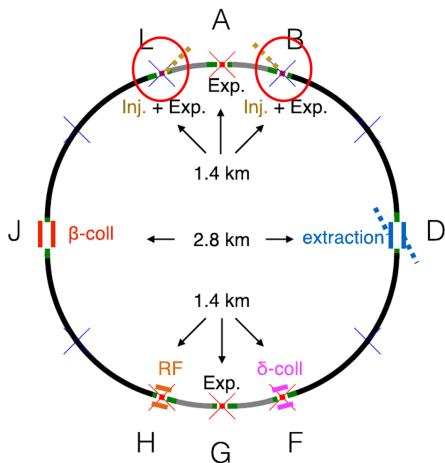


		LHC	HL-LHC	FCC-hh Initial	FCC-hh Nominal
Énergie c.m.	TeV	14		100	
Énergie injection	TeV	0.45		3.3	
Luminosité pic	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	1.0	5.0	5.0	<30
Luminosité intégrée/jour	fb^{-1}	0.47	2.8	2.2	8
Distance entre paquet Δt	ns	25		25	
Charge d'un paquet N	10^{11}	1.15	2.2	1	
Nombre de paquets		2808		10400	
Émittance normalisée	μm	3.75	2.5	2.2	
ξ maximum pour 2 points d'interaction (IPs)		0.01	0.015	0.01 (0.02)	0.03
Fonction β à l'IP	m	0.55	0.15	1.1	0.3
Taille du faisceau à l'IP	μm	≈ 16	≈ 7	6.8	3.5
Longueur RMS du paquet	cm	7.55		8	
Délai supposé entre 2 phases de collision	h			5	4
Énergie stockée par faisceau	GJ	0.392	0.694	8.3	
Puissance rayonnement synchrotron par anneau	MW	0.0036	0.0073	2.4	

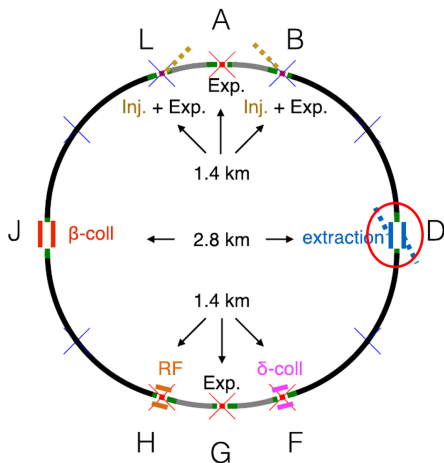
- ▶ 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas β): A et G.
- ▶ 2 régions d'interaction à plus basse luminosité accueillant aussi l'injection: B et L.
- ▶ 1 insertion pour l'extraction: D.
- ▶ 2 insertions pour la collimation (bêtatron et énergie): F et J.
- ▶ 1 insertion pour la RF: H.
- ▶ 4 arcs longs de 16 km et 4 arcs courts de 3.4 km.



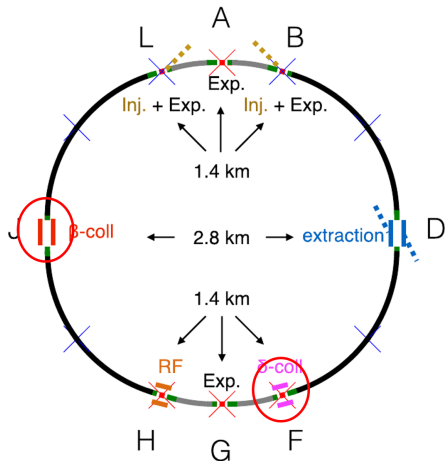
- ▶ 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas β): A et G.
- ▶ 2 régions d'interaction à plus basse luminosité accueillant aussi l'injection: B et L.
- ▶ 1 insertion pour l'extraction: D.
- ▶ 2 insertions pour la collimation (bêtatron et énergie): F et J.
- ▶ 1 insertion pour la RF: H.
- ▶ 4 arcs longs de 16 km et 4 arcs courts de 3.4 km.



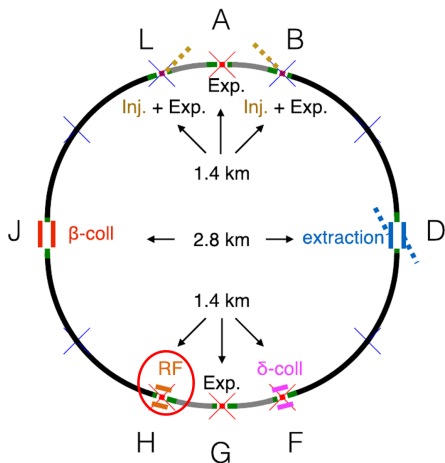
- ▶ 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas β): A et G.
- ▶ 2 régions d'interaction à plus basse luminosité accueillant aussi l'injection: B et L.
- ▶ 1 insertion pour l'extraction: D.
- ▶ 2 insertions pour la collimation (bêtatron et énergie): F et J.
- ▶ 1 insertion pour la RF: H.
- ▶ 4 arcs longs de 16 km et 4 arcs courts de 3.4 km.



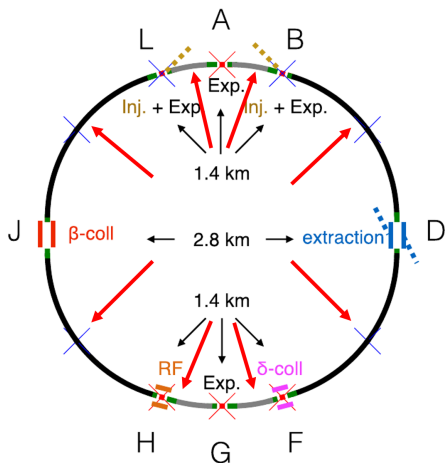
- ▶ 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas β): A et G.
- ▶ 2 régions d'interaction à plus basse luminosité accueillant aussi l'injection: B et L.
- ▶ 1 insertion pour l'extraction: D.
- ▶ 2 insertions pour la collimation (bêtatron et énergie): F et J.
- ▶ 1 insertion pour la RF: H.
- ▶ 4 arcs longs de 16 km et 4 arcs courts de 3.4 km.

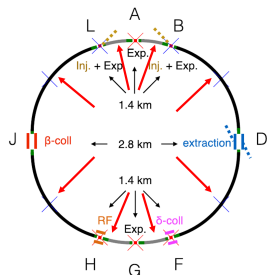


- ▶ 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas β): A et G.
- ▶ 2 régions d'interaction à plus basse luminosité accueillant aussi l'injection: B et L.
- ▶ 1 insertion pour l'extraction: D.
- ▶ 2 insertions pour la collimation (bêtatron et énergie): F et J.
- ▶ 1 insertion pour la RF: H.
- ▶ 4 arcs longs de 16 km et 4 arcs courts de 3.4 km.



- ▶ 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas β): A et G.
- ▶ 2 régions d'interaction à plus basse luminosité accueillant aussi l'injection: B et L.
- ▶ 1 insertion pour l'extraction: D.
- ▶ 2 insertions pour la collimation (bêtatron et énergie): F et J.
- ▶ 1 insertion pour la RF: H.
- ▶ 4 arcs longs de 16 km et 4 arcs courts de 3.4 km.

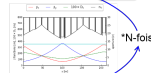
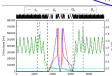




Génie civil

Champs max aimants
Qualité du champTube faisceau
(ouverture,
tolérances)

- Optimisation de la compacité
- Intégration correction linéaire et non linéaire
- Intégration des insertions
- Calcul de stabilité multi-tours (ouverture dynamique)

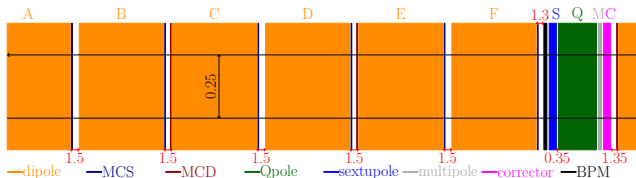
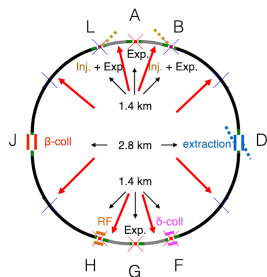
Stabilité du faisceau
(Octupole pour
l'amortissement
Landau)Optique des
insertions

Collimation

- Utilisation de scripts python pour:
 - optimiser et générer les arcs.
 - générer les supresseurs de dispersion.
 - générer les macros d'adaptation.
 - intégrer les optiques des insertions.
- Avance de phase de 90° dans les arcs courts et $90^\circ + \epsilon$ dans les arcs longs (pour ajuster le nombre d'onde et l'avance de phase entre les insertions).

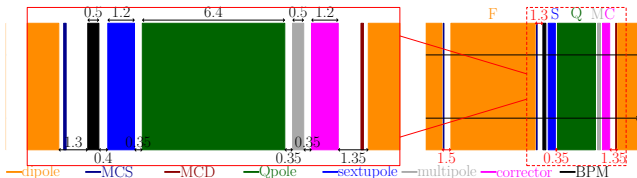
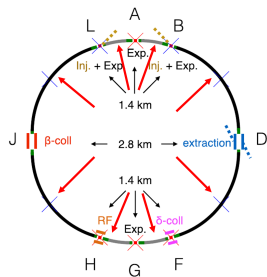
- Chaque cellule d'arc contient:

- 12 dipôles (14.19 m/15.81 T),
- 12 correcteurs de b_3 ,
- 6 correcteurs b_5 ,
- 2 quadripôles (6.4 m/358 T/m),
- 2 hexapôles (1.2 m/7000 T/m²),
- 2 BPMs,
- 2 correcteurs dipolaires,
- 2 correcteurs (quadripôle, quadripôle tourné ou octupôle).



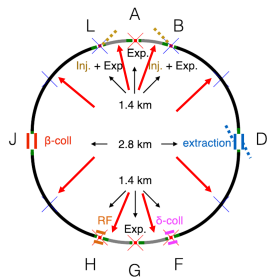
- Utilisation de scripts python pour:
 - **optimiser** et **générer** les arcs.
 - générer les supprimeurs de dispersion.
 - générer les macros d'adaptation.
 - **intégrer** les optiques des insertions.
- **Avance de phase de 90°** dans les arcs courts et 90°+ ϵ dans les arcs longs (pour ajuster le nombre d'onde et l'avance de phase entre les insertions).

- Chaque cellule d'arc contient:
 - 12 dipôles (14.19 m/15.81 T),
 - 12 correcteurs de b_3 ,
 - 6 correcteurs b_5 ,
 - 2 quadripôles (6.4 m/358 T/m),
 - 2 hexapôles (1.2 m/7000 T/m²),
 - 2 BPMs,
 - 2 correcteurs dipolaires,
 - 2 correcteurs (quadripôle, quadripôle tourné ou octupôle).

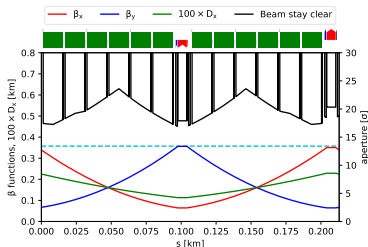


- ▶ Utilisation de scripts python pour:
 - ▶ **optimiser** et **générer** les arcs.
 - ▶ générer les supprimeurs de dispersion.
 - ▶ générer les macros d'adaptation.
 - ▶ **intégrer** les optiques des insertions.
- ▶ **Avance de phase de 90°** dans les arcs courts et 90°+ ϵ dans les arcs longs (pour ajuster le nombre d'onde et l'avance de phase entre les insertions).

- ▶ Chaque cellule d'arc contient:
 - ▶ 12 dipôles (14.19 m/15.81 T),
 - ▶ 12 correcteurs de b_3 ,
 - ▶ 6 correcteurs b_5 ,
 - ▶ 2 quadripôles (6.4 m/358 T/m),
 - ▶ 2 hexapôles (1.2 m/7000 T/m²),
 - ▶ 2 BPMs,
 - ▶ 2 correcteurs dipolaires,
 - ▶ 2 correcteurs (quadripôle, quadripôle tourné ou octupôle).

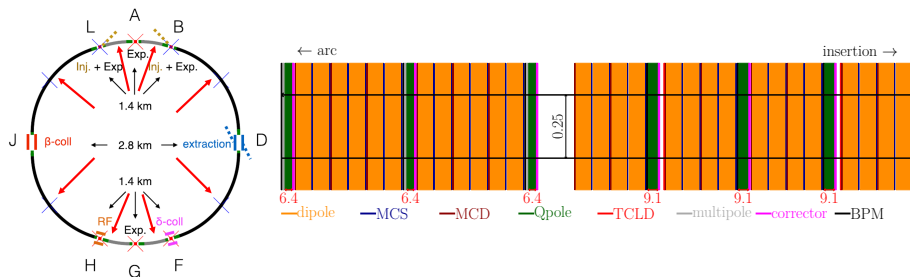


Ouvertures @3.3 TeV, avance de phase 90°

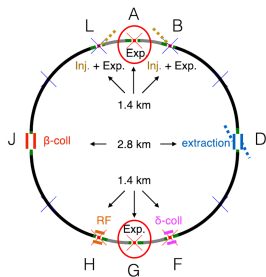
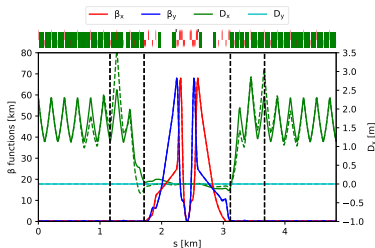


- ▶ Utilisation de scripts python pour:
 - ▶ optimiser et générer les arcs.
 - ▶ générer les supresseurs de dispersion.
 - ▶ générer les macros d'adaptation.
 - ▶ intégrer les optiques des insertions.
- ▶ Avance de phase de 90° dans les arcs courts et $90^\circ + \epsilon$ dans les arcs longs (pour ajuster le nombre d'onde et l'avance de phase entre les insertions).

- ▶ Chaque cellule d'arc contient:
 - ▶ 12 dipôles (14.19 m/15.81 T),
 - ▶ 12 correcteurs de b_3 ,
 - ▶ 6 correcteurs b_5 ,
 - ▶ 2 quadripôles (6.4 m/358 T/m),
 - ▶ 2 hexapôles (1.2 m/7000 T/m²),
 - ▶ 2 BPMs,
 - ▶ 2 correcteurs dipolaires,
 - ▶ 2 correcteurs (quadripôle, quadripôle tourné ou octupôle).

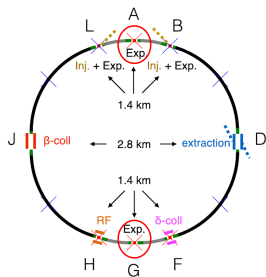
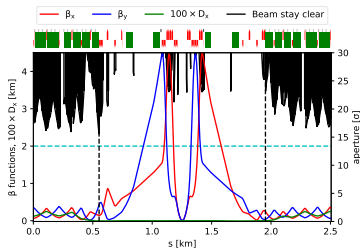


- ▶ But: **adapter les fonctions optiques de l'arc aux insertions.**
- ▶ **Similaire au LHC:** meilleur compromis entre flexibilité et compacité.
- ▶ Insertion de **deux collimateurs** (TCLD) d'un mètre pour nettoyer le faisceau à l'entrée des arcs (comme sur HL-LHC).
- ▶ Les **pics de dispersion et des fonctions β** se situent dans cette section.
- ▶ Contraintes fortes pour garder ces fonctions dans les spécifications d'ouverture.

Optique Collision LSS-PA-EXP $\beta^* = 0.3$ m

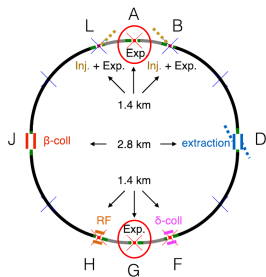
- ▶ Collision: $\beta^* = 0.3$ m et $L^* = 40$ m.
- ▶ Possibilités de descendre jusque $\beta^* = 0.2$ m (marges sur l'ouverture normalisée).
- ▶ **Triplet d'interaction optimisé** (ouverture et longueur) pour tenir les doses près du point d'interaction.
- ▶ Q7 encore à optimiser (dépôt critique: collimateurs à optimiser).

- ▶ Injection: $\beta^* = 4.6$ m.
- ▶ **Correcteurs non linéaires** (hexapôles et octupôles) **nécessaires** localement pour élargir l'ouverture dynamique à bas β^* .
- ▶ **Optique alternative** pour utiliser la **même famille de quadripôles** pour le triplet.
- ▶ **Optique asymétrique** existe ($\beta_x^* = 1.2$ m / $\beta_y^* = 0.15$ m): alternative aux cavités crabe.

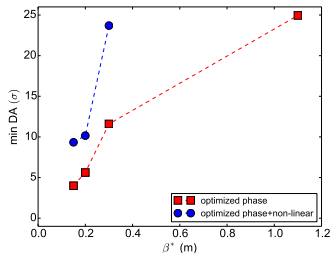
Optique Injection LSS-PA-EXP $\beta^* = 4.6$ m

- ▶ Collision: $\beta^* = 0.3$ m et $L^* = 40$ m.
- ▶ Possibilités de descendre jusque $\beta^* = 0.2$ m (marges sur l'ouverture normalisée).
- ▶ **Triplet d'interaction optimisé** (ouverture et longueur) pour tenir les doses près du point d'interaction.
- ▶ Q7 encore à optimiser (dépôt critique: collimateurs à optimiser).

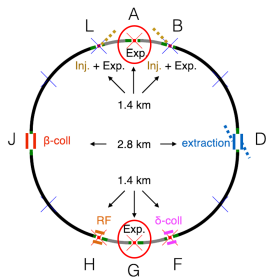
- ▶ Injection: $\beta^* = 4.6$ m.
- ▶ **Correcteurs non linéaires** (hexapôles et octupôles) **nécessaires** localement pour élargir l'ouverture dynamique à bas β^* .
- ▶ **Optique alternative** pour utiliser la **même famille de quadripôles** pour le triplet.
- ▶ **Optique asymétrique** existe ($\beta_x^* = 1.2$ m / $\beta_y^* = 0.15$ m): alternative aux cavités crabe.



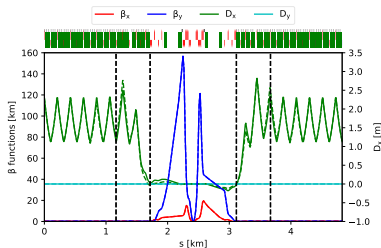
- ▶ Collision: $\beta^* = 0.3$ m et $L^* = 40$ m.
- ▶ Possibilités de descendre jusqu'à $\beta^* = 0.2$ m (marges sur l'ouverture normalisée).
- ▶ **Triplet d'interaction optimisé** (ouverture et longueur) pour tenir les doses près du point d'interaction.
- ▶ Q7 encore à optimiser (dépôt critique: collimateurs à optimiser).



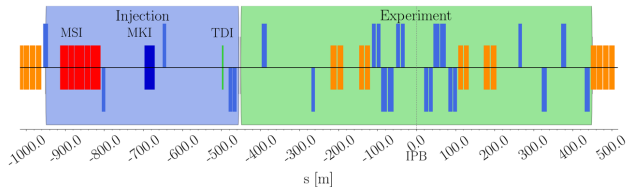
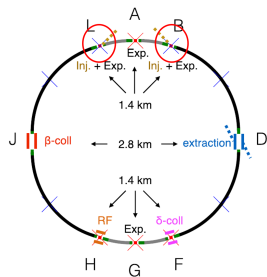
- ▶ Injection: $\beta^* = 4.6$ m.
- ▶ **Correcteurs non linéaires** (hexapôles et octupôles) **nécessaires** localement pour élargir l'ouverture dynamique à bas β^* .
- ▶ **Optique alternative** pour utiliser la même famille de quadripôles pour le triplet.
- ▶ **Optique asymétrique** existe ($\beta_x^* = 1.2$ m / $\beta_y^* = 0.15$ m): alternative aux cavités crabe.



Optique Alternative LSS-PA-EXP $\beta_x^* = 1.2 \text{ m} / \beta_y^* = 0.15 \text{ m}$



- ▶ Collision: $\beta^* = 0.3 \text{ m}$ et $L^* = 40 \text{ m}$.
- ▶ Possibilités de descendre jusqu'à $\beta^* = 0.2 \text{ m}$ (marges sur l'ouverture normalisée).
- ▶ **Triplet d'interaction optimisé** (ouverture et longueur) pour tenir les doses près du point d'interaction.
- ▶ Q7 encore à optimiser (dépôt critique: collimateurs à optimiser).
- ▶ Injection: $\beta^* = 4.6 \text{ m}$.
- ▶ **Correcteurs non linéaires** (hexapôles et octupôles) **nécessaires** localement pour élargir l'ouverture dynamique à bas β^* .
- ▶ **Optique alternative** pour utiliser la **même famille de quadripôles** pour le triplet.
- ▶ **Optique asymétrique** existe ($\beta_x^* = 1.2 \text{ m} / \beta_y^* = 0.15 \text{ m}$): alternative aux cavités crabe.



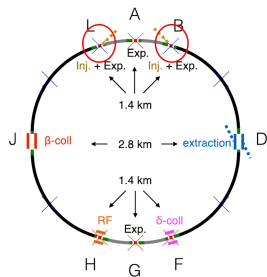
► Deux fonctionnalités:

- **Injection** avec un septum d'injection MSI, des déviateurs rapides (MKI) et un bloc d'arrêt (TDI)
- **Expérience à basse luminosité:** 500 fb⁻¹ intégré. $L^* = 25$ m

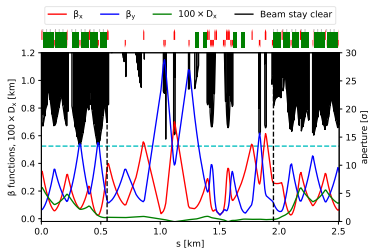
► Injection: $\beta^* = 27$ m.

- Avance de phase entre MKI et TDI proche de 90°.
- Large taille faisceau au TDI pour réduire la densité d'énergie sur l'absorbeur

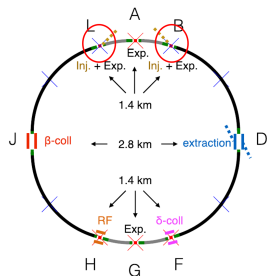
► Collision: $\beta^* = 3$ m.



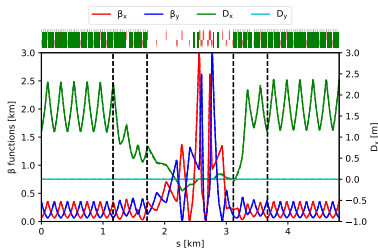
Optique Injection LSS-PB-EXP $\beta^* = 27$ m



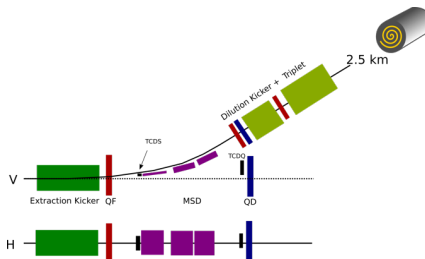
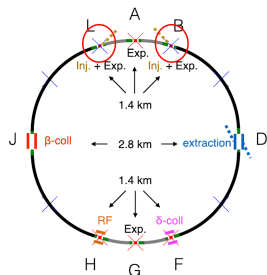
- ▶ Deux fonctionnalités:
 - ▶ **Injection** avec un septum d'injection MSI, des déviateurs rapides (MKI) et un bloc d'arrêt (TDI)
 - ▶ **Expérience à basse luminosité**: 500 fb^{-1} intégré. $L^* = 25$ m
- ▶ Injection: $\beta^* = 27$ m.
 - ▶ Avance de phase entre MKI et TDI proche de 90° .
 - ▶ **Large taille faisceau au TDI** pour réduire la densité d'énergie sur l'absorbeur
- ▶ Collision: $\beta^* = 3$ m.



Optique Collision LSS-PB-EXP $\beta^* = 3.0$ m



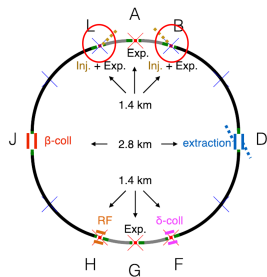
- ▶ Deux fonctionnalités:
 - ▶ **Injection** avec un septum d'injection MSI, des déviateurs rapides (MKI) et un bloc d'arrêt (TDI)
 - ▶ **Expérience à basse luminosité**: 500 fb^{-1} intégré. $L^* = 25$ m
- ▶ Injection: $\beta^* = 27$ m.
 - ▶ Avance de phase entre MKI et TDI proche de 90° .
 - ▶ **Large taille faisceau au TDI** pour réduire la densité d'énergie sur l'absorbeur
- ▶ Collision: $\beta^* = 3$ m.



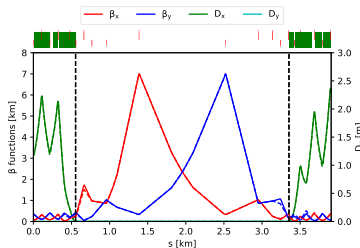
- ▶ Extraction basée sur l'**utilisation de septa d'extraction innovants** SuShi (3.2 T) ou CosTheta Tronqué (4 T).
- ▶ Optique d'extraction optimisée pour la **sécurité de la machine**.

- ▶ **Déviateurs d'extraction hautement segmentés (150)** pour réduire les probabilités d'erreur.

- ▶ Tolérance d'erreur sur les déviateurs: jusqu'à 4 déviateurs défaillants sont tolérés.
- ▶ Dépendant des avances de phase dans la machine.

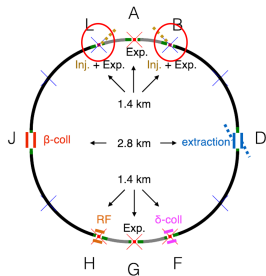


Optique ESS-PD-EXT



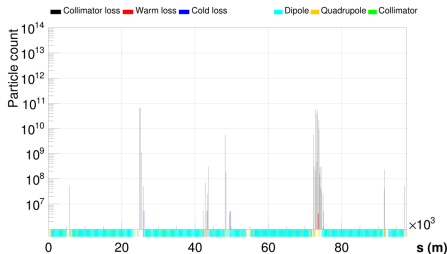
- ▶ Extraction basée sur l'**utilisation de septa d'extraction innovants** SuShi (3.2 T) ou CosTheta Tronqué (4 T).
- ▶ Optique d'extraction optimisée pour la **sécurité de la machine**.

- ▶ **Déviateurs d'extraction hautement segmentés (150)** pour réduire les probabilités d'erreur.
 - ▶ Tolérance d'erreur sur les déviateurs: jusqu'à 4 déviateurs défectueux sont tolérés.
 - ▶ Dépendant des avances de phase dans la machine.

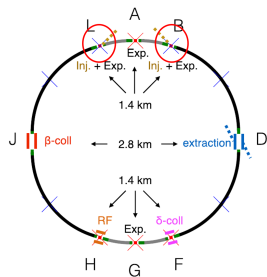


- ▶ Extraction basée sur l'**utilisation de septa d'extraction innovants** SuShi (3.2 T) ou CosTheta Tronqué (4 T).
- ▶ Optique d'extraction optimisée pour la **sécurité de la machine**.

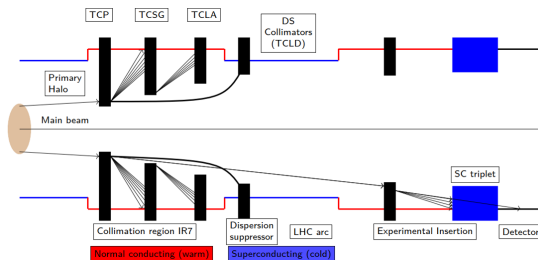
Cas de 4 déviateurs défaillants. Perte autorisée: 10^{11}



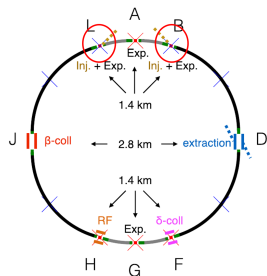
- ▶ **Déviateurs d'extraction hautement segmentés (150)** pour réduire les probabilités d'erreur.
 - ▶ Tolérance d'erreur sur les déviateurs: jusque 4 déviateurs défaillants sont tolérés.
 - ▶ Dépendant des avances de phase dans la machine.



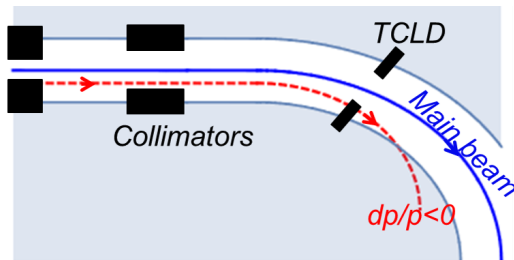
Hiérarchie des collimateurs



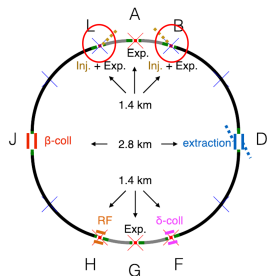
- ▶ **Collimation à plusieurs étages** (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ **Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les supresseurs de dispersion** pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en β **similaire au LHC**.
- ▶ Optique de la section de collimation en énergie déduite aussi du LHC.
- ▶ **Le système de protection fonctionne bien** et les **absorbeurs devraient pouvoir tenir** la puissance faisceau perdue (11.6 MW).
- ▶ **Sujets futurs**: absorbeurs primaires tournés, collimation avec un cristal, utilisation de faisceaux creux d'électrons pour contrôler activement le halo, nouveaux matériaux, optique plus compacte...



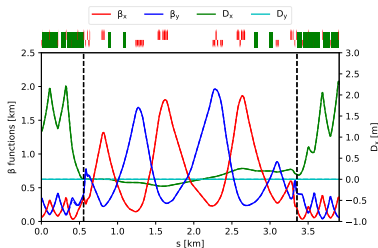
Insertions de collimateurs à l'entrée des arcs



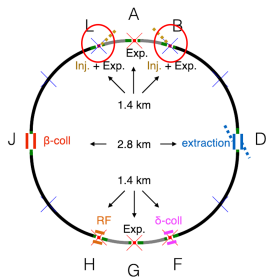
- ▶ **Collimation à plusieurs étages** (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ **Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les supresseurs de dispersion** pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en β **similaire au LHC**.
- ▶ Optique de la section de collimation en énergie déduite aussi du LHC.
- ▶ **Le système de protection fonctionne bien** et les **absorbeurs devraient pouvoir tenir** la puissance faisceau perdue (11.6 MW).
- ▶ **Sujets futurs**: absorbeurs primaires tournés, collimation avec un cristal, utilisation de faisceaux creux d'électrons pour contrôler activement le halo, nouveaux matériaux, optique plus compacte...



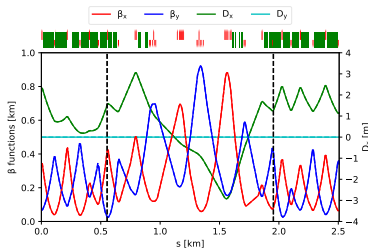
Optique Collimation β ESS-PJ-COL



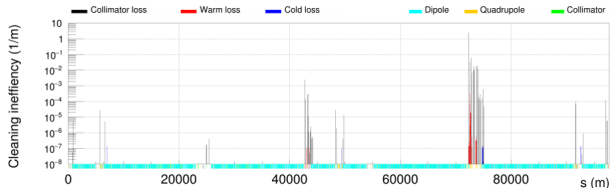
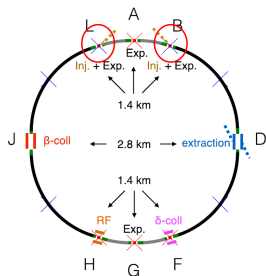
- ▶ **Collimation à plusieurs étages** (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ **Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les supprimeurs de dispersion** pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en β **similaire au LHC**.
- ▶ Optique de la section de collimation en énergie déduite aussi du LHC.
- ▶ **Le système de protection fonctionne bien** et les **absorbeurs devraient pouvoir tenir** la puissance faisceau perdue (11.6 MW).
- ▶ **Sujets futurs**: absorbeurs primaires tournés, collimation avec un cristal, utilisation de faisceaux creux d'électrons pour contrôler activement le halo, nouveaux matériaux, optique plus compacte...



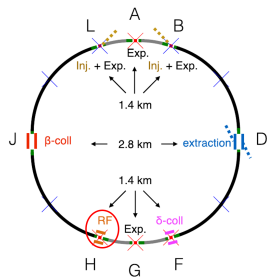
Optique Collimation δ LSS-PF-COL



- ▶ **Collimation à plusieurs étages** (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ **Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les supprimeurs de dispersion** pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en β **similaire au LHC**.
- ▶ Optique de la section de collimation en énergie déduite aussi du LHC.
- ▶ **Le système de protection fonctionne bien** et les **absorbeurs devraient pouvoir tenir** la puissance faisceau perdue (11.6 MW).
- ▶ **Sujets futurs**: absorbeurs primaires tournés, collimation avec un cristal, utilisation de faisceaux creux d'électrons pour contrôler activement le halo, nouveaux matériaux, optique plus compacte...

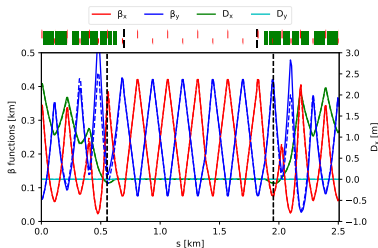


- ▶ **Collimation à plusieurs étages** (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ **Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les supprimeurs de dispersion** pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en β **similaire au LHC**.
- ▶ Optique de la section de collimation en énergie déduite aussi du LHC.
- ▶ **Le système de protection fonctionne bien** et les **absorbeurs devraient pouvoir tenir** la puissance faisceau perdue (11.6 MW).
- ▶ **Sujets futurs**: absorbeurs primaires tournés, collimation avec un cristal, utilisation de faisceaux creux d'électrons pour contrôler activement le halo, nouveaux matériaux, optique plus compacte...

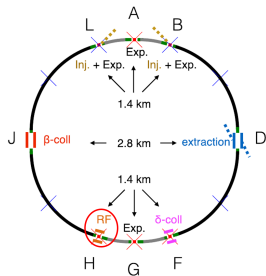


- ▶ Optique faite de mailles FODO.
- ▶ Les **contraintes sur la stabilité longitudinale** ont donné celles sur la tension RF nécessaire.
 - ▶ En fin de cycle $V_{RF} = 38$ MV.
 - ▶ En début de cycle $\tau_{4\sigma} = 1.35$ ns.
 - ▶ Grossissement émittance longitudinale $\propto \sqrt{E}$.

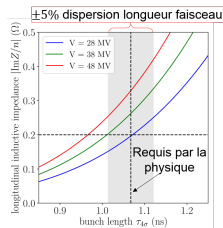
Optique section RF LSS-PH-RFS



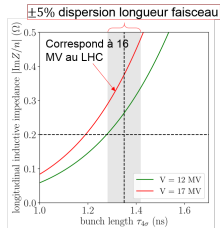
- ▶ Puissance RF calculée pour différents modes de compensation du beam-loading transitoire.
 - ▶ La **pleine compensation** requiert une puissance pic de **600 kW** contre 400 kW sans compensation.



Seuils de stabilité



Seuils à 50 TeV

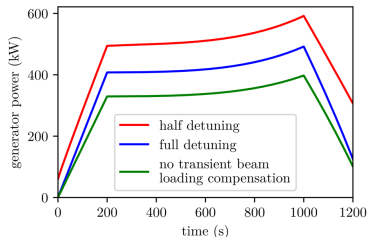


Seuils à 3.3 TeV

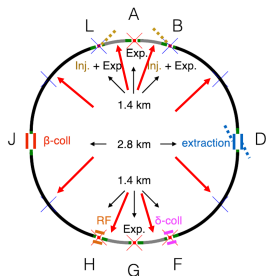
- ▶ Optique faite de mailles FODO.
- ▶ Les **contraintes sur la stabilité longitudinale** ont donné celles sur la tension RF nécessaire.
 - ▶ En fin de cycle $V_{RF} = 38$ MV.
 - ▶ En début de cycle $\tau_{4\sigma} = 1.35$ ns.
 - ▶ Grossissement émittance longitudinale $\propto \sqrt{E}$.

- ▶ Puissance RF calculée pour différents modes de compensation du beam-loading transitoire.

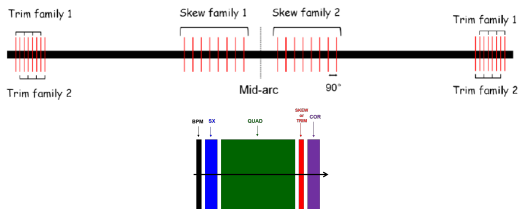
- ▶ La **pleine compensation** requiert une puissance pic de **600 kW** contre 400 kW sans compensation.



- ▶ Optique faite de mailles FODO.
- ▶ Les **contraintes sur la stabilité longitudinale** ont donné celles sur la tension RF nécessaire.
 - ▶ En fin de cycle $V_{RF} = 38$ MV.
 - ▶ En début de cycle $\tau_{4\sigma} = 1.35$ ns.
 - ▶ Grossissement émittance longitudinale $\propto \sqrt{E}$.
- ▶ Puissance RF calculée pour différents modes de compensation du beam-loading transitoire.
 - ▶ La **pleine compensation** requiert une puissance pic de **600 kW** contre 400 kW sans compensation.



Répartition des correcteurs dans les arcs



- La correction est faite en plusieurs étapes:

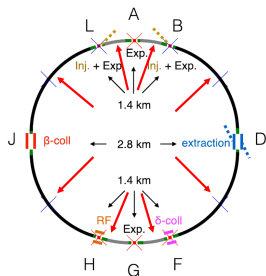
- 1 Correction analytique du couplage linéaire (avec les quadripôles tournés)
- 2 Correction globale de l'orbite
- 3 Correction du nombre d'onde
- 4 Si collision, étapes 2 et 3 répétées.

- Erreurs résiduelles acceptables.

- Le **battement des fonctions β et de la dispersion** est encore à **corriger**.

- Correction de la dispersion résiduelle (due à une orbite non nulle dans le triplet d'interaction):

- HL-LHC: orbite non nulle dans les hexapôles. Non acceptable pour FCC-hh: déplacements de 9 mm!
- SSC: famille de 4 quadripôles (droits ou tournés) dans une zone dispersive. **Solution adoptée.**



Valeurs résiduelles (quartile à 90%)

Observable	Injection	Collision
Hori. orbit	0.80 mm	0.79 mm
Vert. orbit	0.73 mm	0.73 mm
Hori. angle	26 μ rad	26 μ rad
Vert. angle	25 μ rad	27 μ rad
Hori. beta-beating	22 ‰	34 ‰
Vert. beta-beating	24 ‰	42 ‰
Hori. disp. beating	0.023 $\frac{1}{\sqrt{m}}$	0.036 $\frac{1}{\sqrt{m}}$
Vert. disp. beating	0.028 $\frac{1}{\sqrt{m}}$	0.027 $\frac{1}{\sqrt{m}}$
Hori. orbit corr. str.	0.31 Tm	4.7 Tm
Vert. orbit corr. str.	0.28 Tm	4.2 Tm
Skew quad. str.	8.57 T/m	148 T/m
Trim quad. str.	3.68 T/m	140 T/m

- La correction est faite en plusieurs étapes:

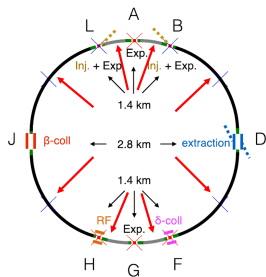
- 1 Correction analytique du couplage linéaire (avec les quadripôles tournés)
- 2 Correction globale de l'orbite
- 3 Correction du nombre d'onde
- 4 Si collision, étapes 2 et 3 répétées.

- Erreurs résiduelles acceptables.

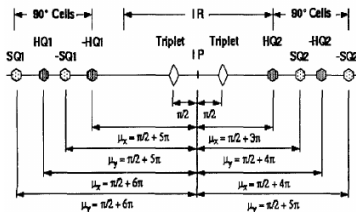
- Le **battement des fonctions β** et de la **dispersion** est encore à **corriger**.

- Correction de la dispersion résiduelle (due à une orbite non nulle dans le triplet d'interaction):

- HL-LHC: orbite non nulle dans les hexapôles. Non acceptable pour FCC-hh: déplacements de 9 mm!
- SSC: famille de 4 quadripôles (droits ou tournés) dans une zone dispersive. **Solution adoptée.**



Corrections dispersion résiduelles (à la SSC)



- La correction est faite en plusieurs étapes:

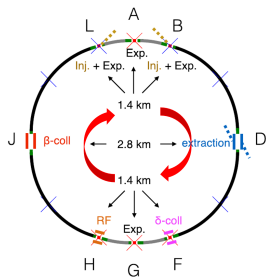
- 1 Correction analytique du couplage linéaire (avec les quadripôles tournés)
- 2 Correction globale de l'orbite
- 3 Correction du nombre d'onde
- 4 Si collision, étapes 2 et 3 répétées.

- Erreurs résiduelles acceptables.

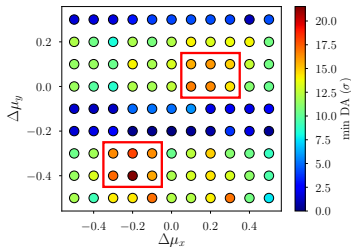
- Le **battement des fonctions β et de la dispersion** est encore à **corriger**.

- Correction de la dispersion résiduelle (due à une orbite non nulle dans le triplet d'interaction):

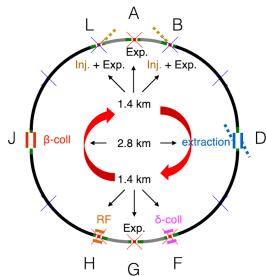
- HL-LHC: orbite non nulle dans les hexapôles. Non acceptable pour FCC-hh: déplacements de 9 mm!
- SSC: famille de 4 quadripôles (droits ou tournés) dans une zone dispersive. **Solution adoptée.**



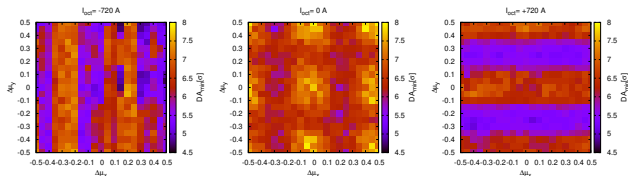
Ouverture dynamique avec erreurs à la collision



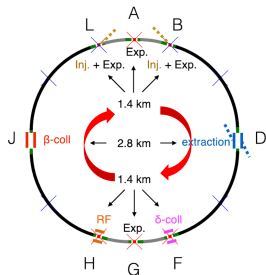
- ▶ **L'ouverture dynamique (OD) dépend** fortement de l'**avance de phase** entre les IPs A et G à la collision.
- ▶ Vrai aussi pour les interactions faisceau-faisceau et octupôles.
- ▶ Polarité négative pour les octupôles.
- ▶ **Avance de phase compatible** trouvée pour la collision.
- ▶ $OD > 5\sigma$ avec erreurs multipolaires + faisceau-faisceau + $\beta^* = 0.3$ m.
- ▶ A l'injection, l'OD est **dominée** par les **erreurs** dans les **dipôles**.
- ▶ L'OD est **inférieure** à la **valeur cible** avec les octupôles.
- ▶ **Valeur au-dessus des valeurs seuils** pour la collimation (comme au LHC).
- ▶ OD réduite par la dispersion en énergie du faisceau.



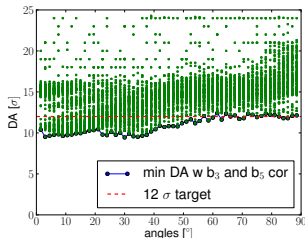
Ouverture dynamique interaction faisceau-faisceau + octupôles



- ▶ **L'ouverture dynamique (OD) dépend** fortement de l'**avance de phase** entre les IPs A et G à la collision.
- ▶ Vrai aussi pour les interactions faisceau-faisceau et octupôles.
- ▶ Polarité négative pour les octupôles.
- ▶ **Avance de phase compatible** trouvée pour la collision.
- ▶ $OD > 5\sigma$ avec erreurs multipolaires + faisceau-faisceau + $\beta^* = 0.3$ m.
- ▶ A l'injection, l'OD est **dominée** par les **erreurs** dans les **dipôles**.
- ▶ L'OD est **inférieure** à la **valeur cible** avec les octupôles.
- ▶ **Valeur au-dessus des valeurs seuils** pour la collimation (comme au LHC).
- ▶ OD réduite par la dispersion en énergie du faisceau.

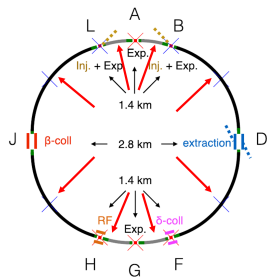


Ouverture dynamique à l'injection + erreurs + octupôles

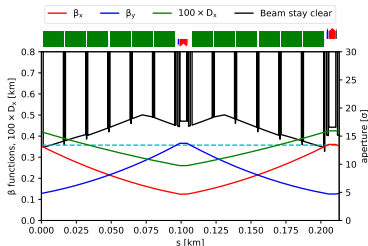


- ▶ **L'ouverture dynamique (OD) dépend** fortement de l'**avance de phase** entre les IPs A et G à la collision.
- ▶ Vrai aussi pour les interactions faisceau-faisceau et octupôles.
- ▶ Polarité négative pour les octupôles.
- ▶ **Avance de phase compatible** trouvée pour la collision.
- ▶ $OD > 5\sigma$ avec erreurs multipolaires + faisceau-faisceau + $\beta^* = 0.3$ m.

- ▶ A l'injection, l'OD est **dominée** par les **erreurs** dans les **dipôles**.
- ▶ L'OD est **inférieure à la valeur cible** avec les octupôles.
- ▶ **Valeur au-dessus des valeurs seuils** pour la collimation (comme au LHC).
- ▶ OD réduite par la dispersion en énergie du faisceau.



Ouvertures @3.3 TeV, avance de phase 60°



- Alternative avec une **avance de phase** par cellule de **60°** contre 90° .
- Gradient intégré du quadripôle multiplié par $\frac{\sin 30^\circ}{\sin 45^\circ} \approx 0.7$.
- ☺ Le quadripôle est raccourci de 6.4 m à 4.5 m.
- Dipôles rallongés de 0.33 m.
- ☺ **Champ du dipôle: 15.44 T.**
- ☺ Dispersion plus grande (facteur 2): **réduction de l'ouverture normalisée.**

- ☺ **Correction de la chromaticité 2 fois plus efficace** (D_x plus grands).
- ☺ **Modification du schéma de correction.**
 - Utiliser 6 quadripôles séparés chacun de 60° est proposé pour corriger le battement des fonctions β , la dispersion, le couplage (avec des quadripôles tournés), ou le nombre d'onde.

- ▶ Une **optique intégrée et consolidée** du collisionneur FCC-hh a été livrée.
- ▶ Elle **respecte une bonne partie des contraintes**:
 - ▶ Champs des aimants dans les spécifications.
 - ▶ Performances au point d'interaction.
 - ▶ Ouverture physique.
 - ▶ Protection de la machine efficace (collimation).
 - ▶ Schémas de correction.
- ▶ L'ensemble des études est compilée dans un **rapport conceptuel** (volume 3): <https://fcc-cdr.web.cern.ch>
- ▶ **Optiques alternatives** également développées.
- ▶ **Pas de point d'arrêt fort au projet identifié.**
- ▶ Mais toujours de la place pour optimiser la machine.

Merci pour votre attention et à toute la
collaboration FCC-hh pour le travail accompli!

Les Journées accélérateurs

Roscoff

2 - 4 octobre 2019

Thèmes

Présentations orales et posters

Accélérateurs de hadrons

Accélérateurs de leptons

Accélération laser-plasma

Technologie des accélérateurs

Applications et aspects industriels



Société Française
de Physique
DIVISION ACCÉLÉRATEURS

Secrétariat : Sandra Cardot
email : roscoff@accelerateurs.fr



Organisé par le bureau de la Division Accélérateurs de la SFP :

Laurent Nadolski (SOLEIL), Jean-Luc Révol (ESRF), Thomas Thuillier (LPSC), Nicolas Delerue (LAL),
Alain Savalle (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM),
Eric Giguet (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

<http://accelerateurs.sfpnet.fr/>