

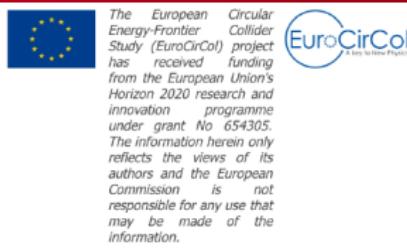
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



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



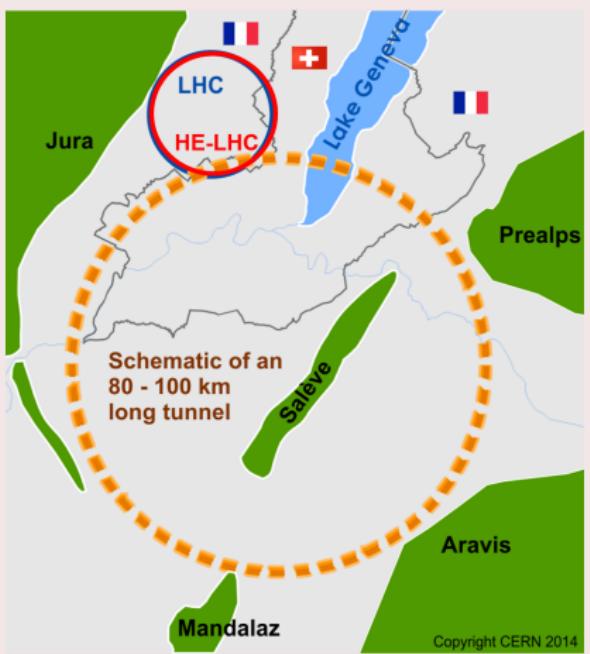
- ▶ Découverte du Higgs
- ▶ Le modèle standard est confirmé.
- ▶ Questions toujours non élucidées:
 - ▶ Masse du neutrino
 - ▶ Asymétrie matière/antimatière
 - ▶ Matière noire
 - ▶ Nouvelle physique: supersymétrie...



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.

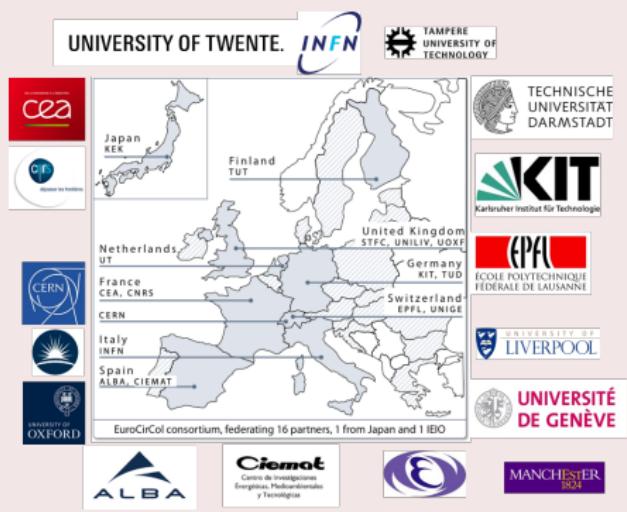
Proton-électron: FCC-he

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

Alternative: HE-LHC

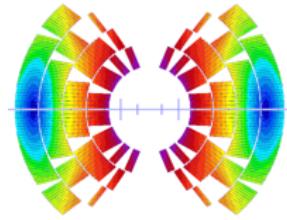
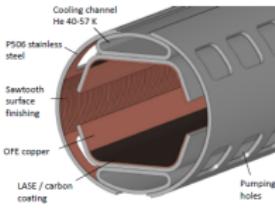
- ▶ Utilise la technologie de FCC-hh.

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"

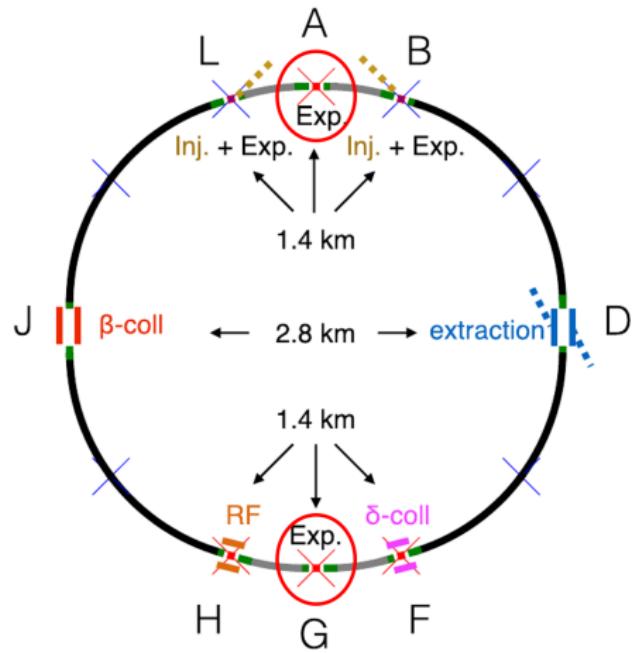


cea Paramètres de l'anneau

		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	
ζ 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	

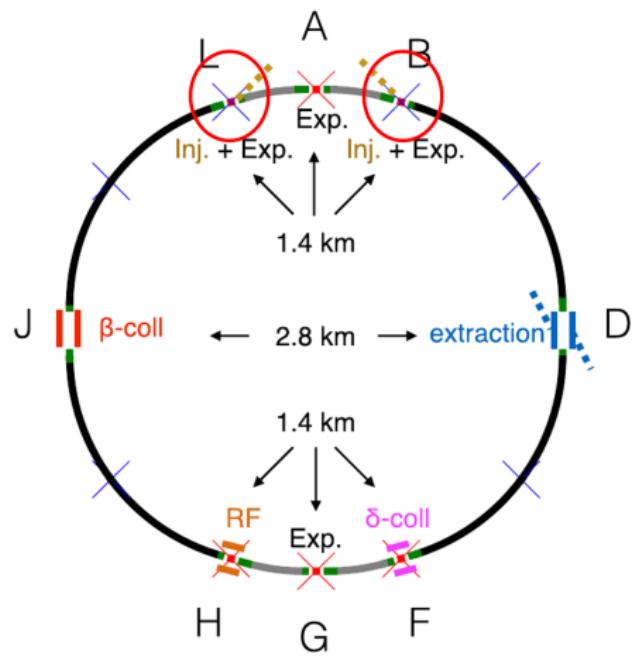
cea Schéma du collisionneur

- ▶ 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.



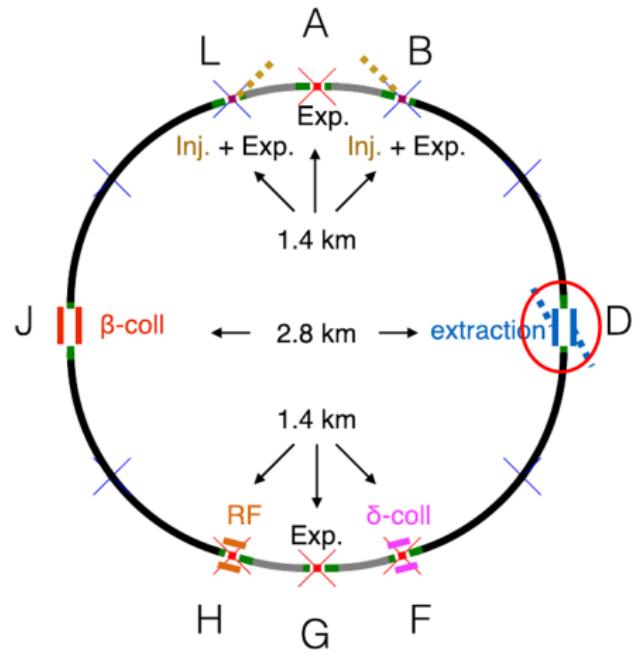
cea Schéma du collisionneur

- ▶ 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.



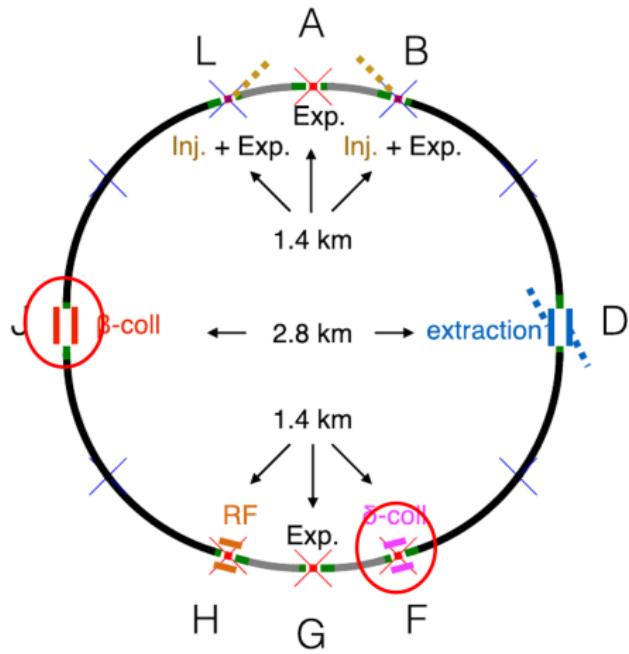
cea Schéma du collisionneur

- ▶ 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.



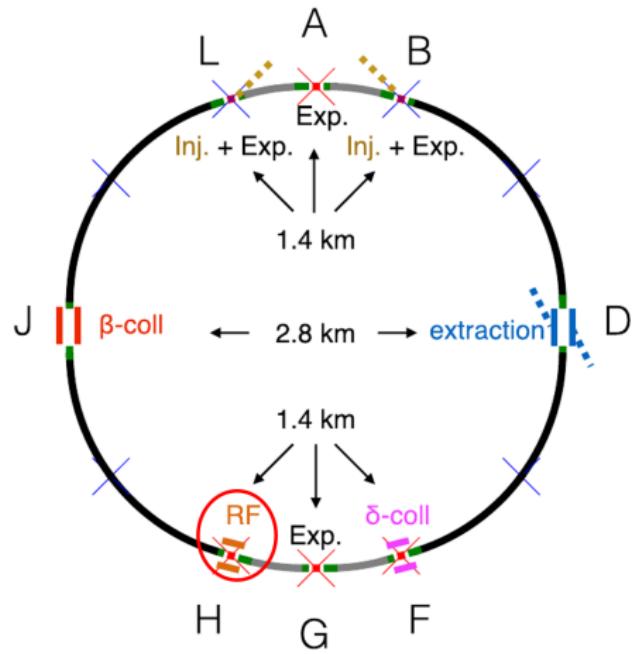
cea Schéma du collisionneur

- ▶ 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.



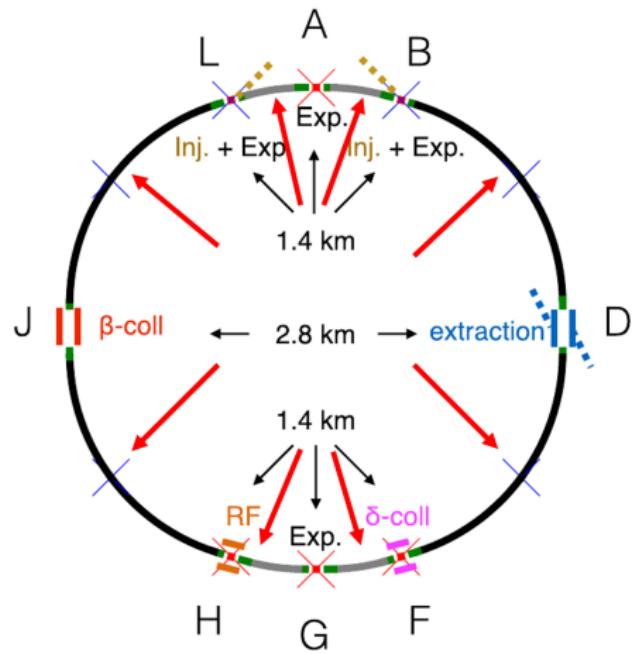
cea Schéma du collisionneur

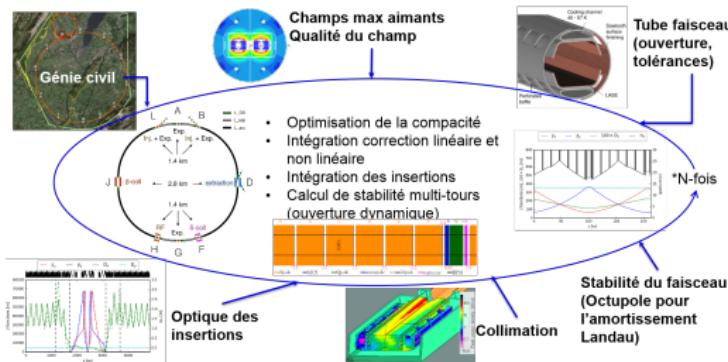
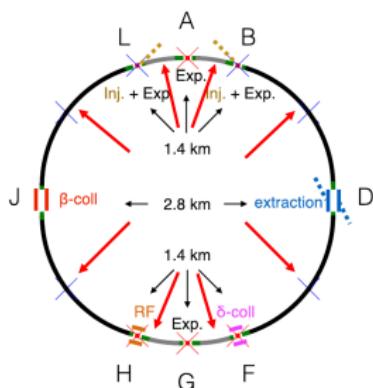
- ▶ 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas β): A et G.
- ▶ 2 régions d'interaction à plus basse luminosité accueillant aussi l'injection: B et L.
- ▶ 1 insertion pour l'extraction: D.
- ▶ 2 insertions pour la collimation (bêtatron et énergie): F et J.
- ▶ 1 insertion pour la RF: H.
- ▶ 4 arcs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



cea Schéma du collisionneur

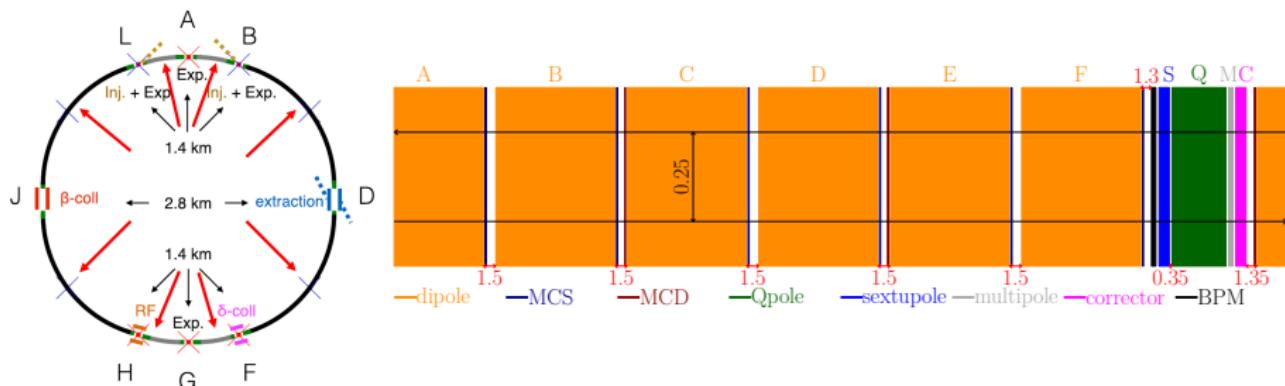
- ▶ 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas β): A et G.
- ▶ 2 régions d'interaction à plus basse luminosité accueillant aussi l'injection: B et L.
- ▶ 1 insertion pour l'extraction: D.
- ▶ 2 insertions pour la collimation (bêtatron et énergie): F et J.
- ▶ 1 insertion pour la RF: H.
- ▶ 4 arcs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





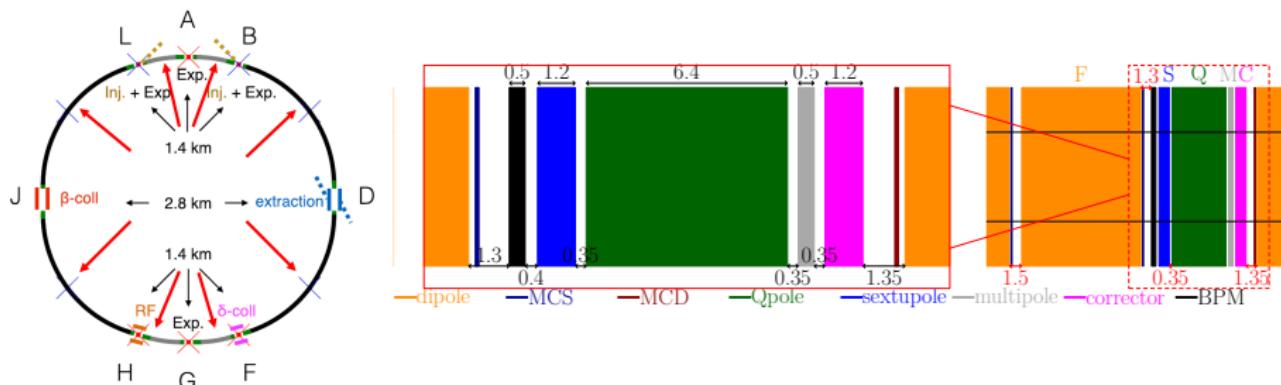
- ▶ Utilisation de scripts python pour:
 - ▶ optimiser et générer les arcs.
 - ▶ générer les suppresseurs de dispersion.
 - ▶ générer les macros d'adaptation.
 - ▶ intégrer les optiques des insertions.
- ▶ Avance de phase de 90° dans les arcs courts et $90^\circ + \epsilon$ dans les arcs longs (pour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

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



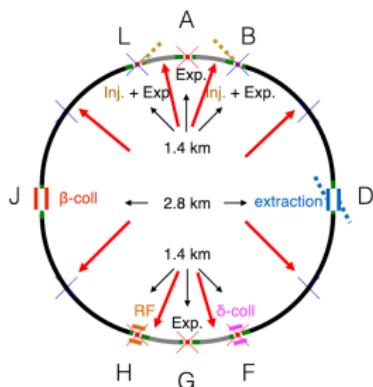
- ▶ Utilisation de scripts python pour:
 - ▶ optimiser et générer les arcs.
 - ▶ générer les suppresseurs de dispersion.
 - ▶ générer les macros d'adaptation.
 - ▶ intégrer les optiques des insertions.
- ▶ Avance de phase de 90° dans les arcs courts et $90^\circ + \epsilon$ dans les arcs longs (pour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

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

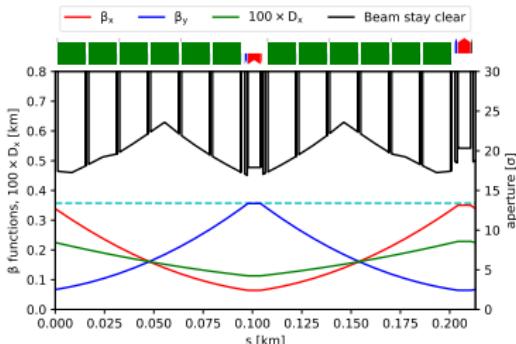


- ▶ Utilisation de scripts python pour:
 - ▶ optimiser et générer les arcs.
 - ▶ générer les suppresseurs de dispersion.
 - ▶ générer les macros d'adaptation.
 - ▶ intégrer les optiques des insertions.
- ▶ Avance de phase de 90° dans les arcs courts et $90^\circ + \epsilon$ dans les arcs longs (pour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

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



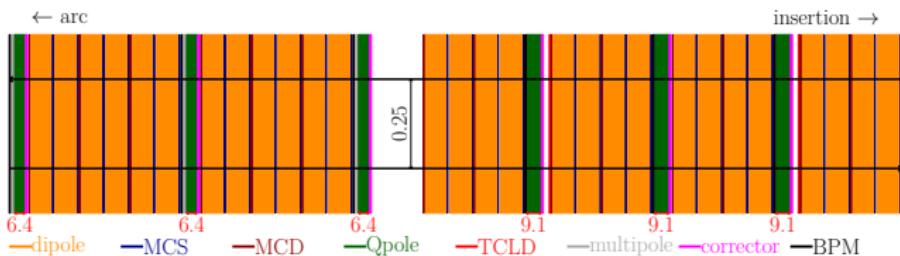
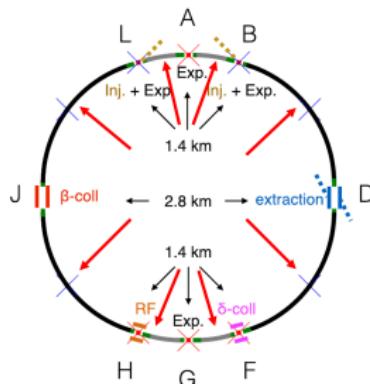
Ouvertures @3.3 TeV, avance de phase 90°



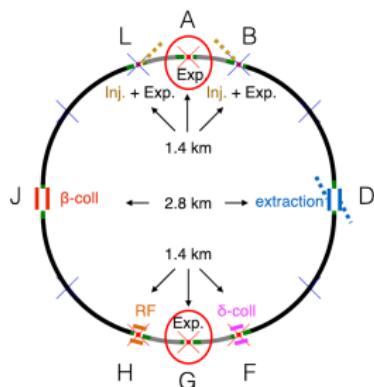
- ▶ Utilisation de scripts python pour:
 - ▶ optimiser et générer les arcs.
 - ▶ générer les suppresseurs de dispersion.
 - ▶ générer les macros d'adaptation.
 - ▶ intégrer les optiques des insertions.
- ▶ Avance de phase de 90° dans les arcs courts et $90^\circ + \epsilon$ dans les arcs longs (pour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

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

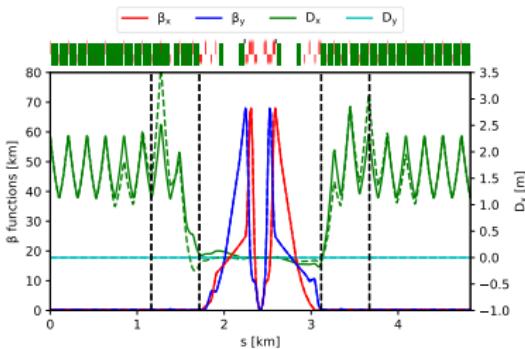
cea Supresseurs de dispersion



- ▶ 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.

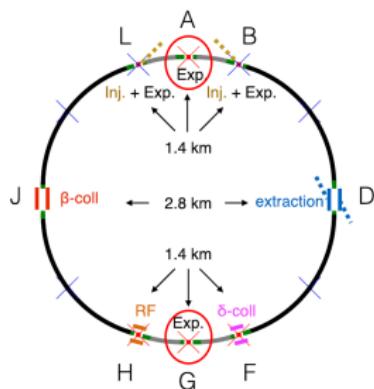


Optique Collision LSS-PA-EXP $\beta^* = 0.3$ m



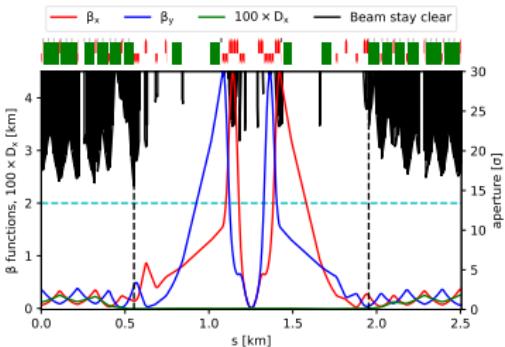
- ▶ Collision: $\beta^* = 0.3$ m et $L^* = 40$ m.
- ▶ Possibilités de descendre jusque $\beta^* = 0.2$ m (marges sur l'ouverture normalisée).
- ▶ **Triplet d'interaction optimisé** (ouverture et longueur) pour tenir les doses près du point d'interaction.
- ▶ Q7 encore à optimiser (dépôt critique: collimateurs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

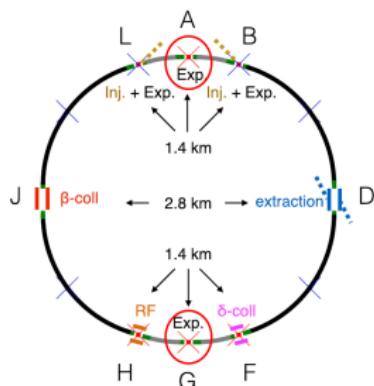


- ▶ Collision: $\beta^* = 0.3$ m et $L^* = 40$ m.
- ▶ Possibilités de descendre jusque $\beta^* = 0.2$ m (marges sur l'ouverture normalisée).
- ▶ **Triplet d'interaction optimisé** (ouverture et longueur) pour tenir les doses près du point d'interaction.
- ▶ Q7 encore à optimiser (dépôt critique: collimateurs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

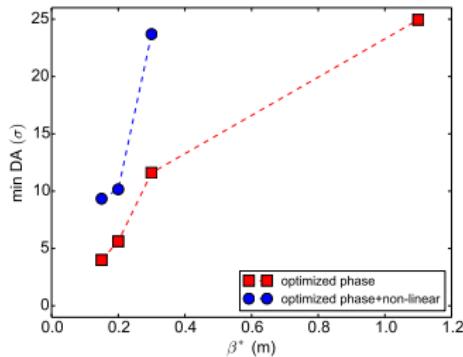
Optique Injection LSS-PA-EXP $\beta^* = 4.6$ m



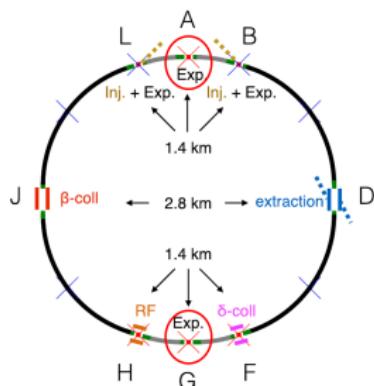
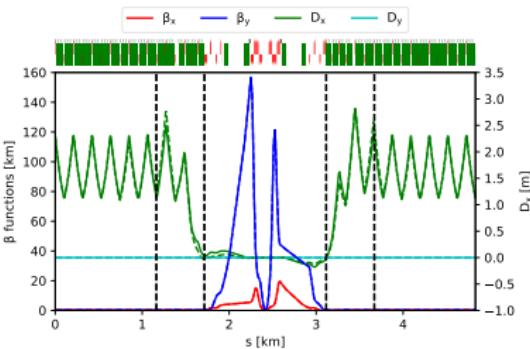
- ▶ Injection: $\beta^* = 4.6$ m.
- ▶ **Correcteurs non linéaires** (hexapôles et octupôles) **nécessaires** localement pour élargir l'ouverture dynamique à bas β^* .
- ▶ **Optique alternative** pour utiliser la **même famille de quadripôles** pour le triplet.
- ▶ **Optique asymétrique** existe ($\beta_x^*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



- ▶ 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).

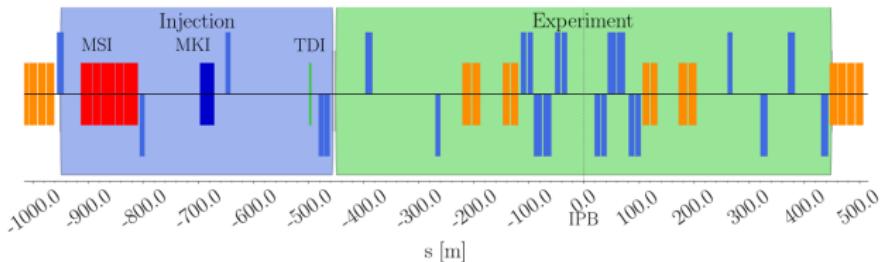
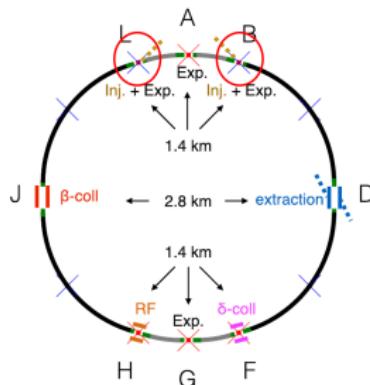


- ▶ Injection: $\beta^* = 4.6$ m.
- ▶ **Correcteurs non linéaires** (hexapôles et octupôles) **nécessaires** localement pour élargir l'ouverture dynamique à bas β^* .
- ▶ **Optique alternative** pour utiliser la **même famille de quadripôles** pour le triplet.
- ▶ **Optique asymétrique** existe ($\beta_x^*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

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 jusque $\beta^* = 0.2 \text{ m}$ (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 crabes.

cea Insertions Basse \mathcal{L} + injection

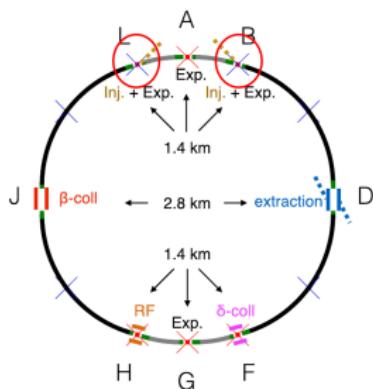
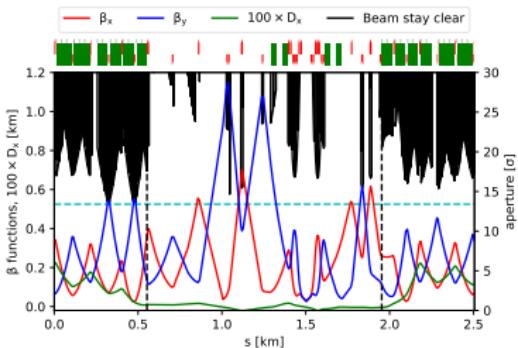
► Deux fonctionnalités:

- **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. $L^* = 25 \text{ m}$

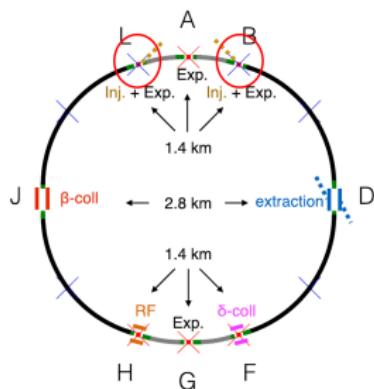
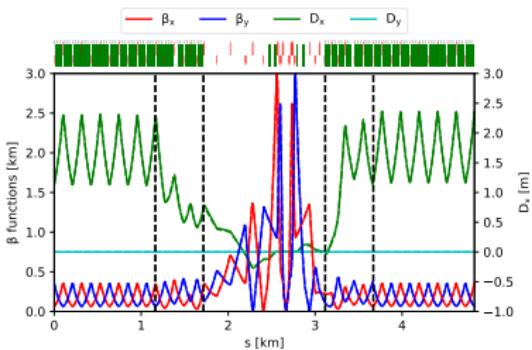
► Injection: $\beta^* = 27 \text{ m}$.

- 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: $\beta^* = 3 \text{ m}$.

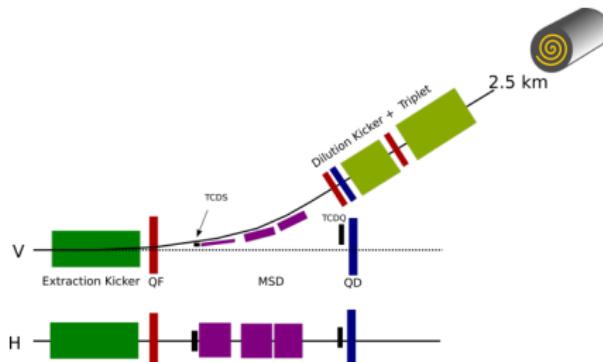
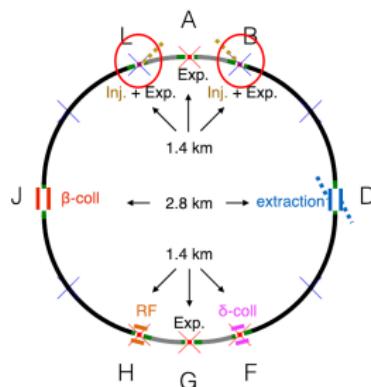
cea Insertions Basse \mathcal{L} + injectionOptique Injection LSS-PB-EXP $\beta^* = 27$ m

- ▶ 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. $L^* = 25 \text{ m}$
- ▶ **Injection: $\beta^* = 27 \text{ m}$.**
 - ▶ 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: $\beta^* = 3 \text{ m}$.

cea Insertions Basse \mathcal{L} + injectionOptique Collision LSS-PB-EXP $\beta^* = 3.0$ m

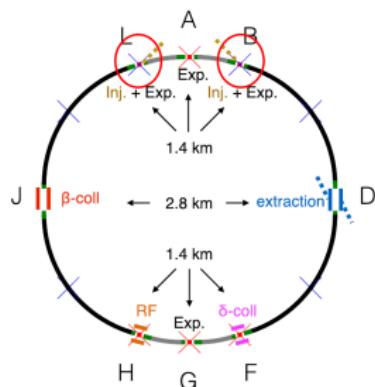
- ▶ Deux fonctionnalités:
 - ▶ **Injection** avec un septum d'injection MSI, des déviateurs rapides (MKI) et un bloc d'arrêt (TDI)
 - ▶ **Expérience à basse luminosité:** 500 fb^{-1} intégré. $L^* = 25 \text{ m}$

- ▶ **Injection:** $\beta^* = 27 \text{ m}$.
 - ▶ 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:** $\beta^* = 3 \text{ m}$.

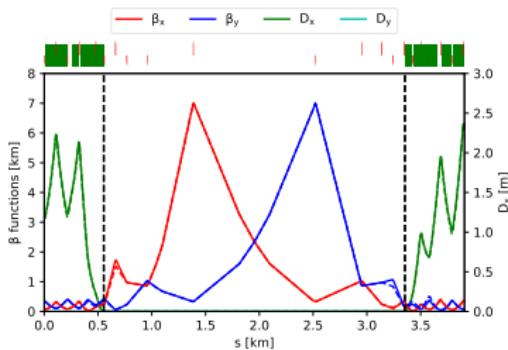


- ▶ Extraction basée sur l'**utilisation de septa d'extraction innovants SuShi** (3.2 T) ou **CosTheta Tronqué** (4 T).
- ▶ Optique d'extraction optimisée pour la sécurité de la machine.

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

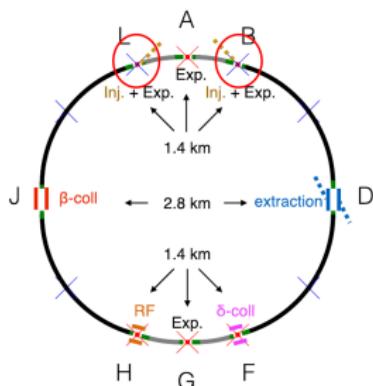


Optique ESS-PD-EXT



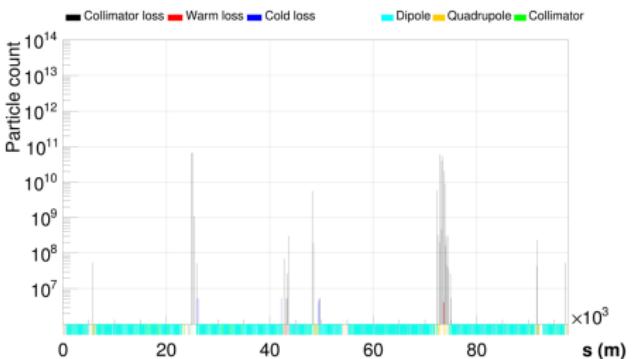
- ▶ Extraction basée sur l'**utilisation de septa d'extraction innovants** SuShi (3.2 T) ou CosTheta Tronqué (4 T).
- ▶ Optique d'extraction optimisée pour la **sécurité de la machine**.

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

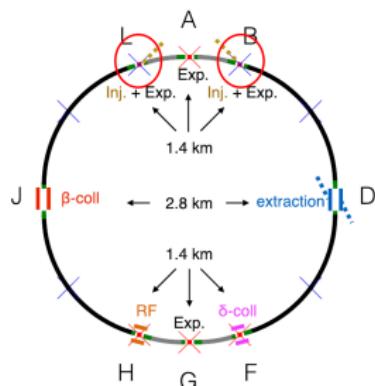


- ▶ Extraction basée sur l'**utilisation de septa d'extraction innovants SuShi** (3.2 T) ou CosTheta Tronqué (4 T).
- ▶ Optique d'extraction optimisée pour la **sécurité de la machine**.

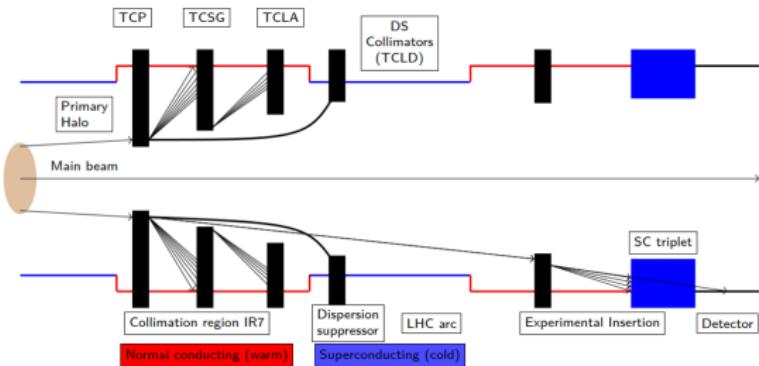
Cas de 4 déviateurs défaillants. Perte autorisée: 10^{11}



- ▶ **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.

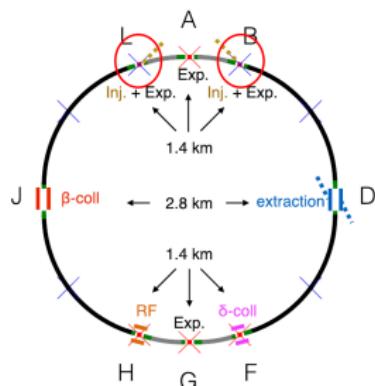


Hiérarchie des collimateurs

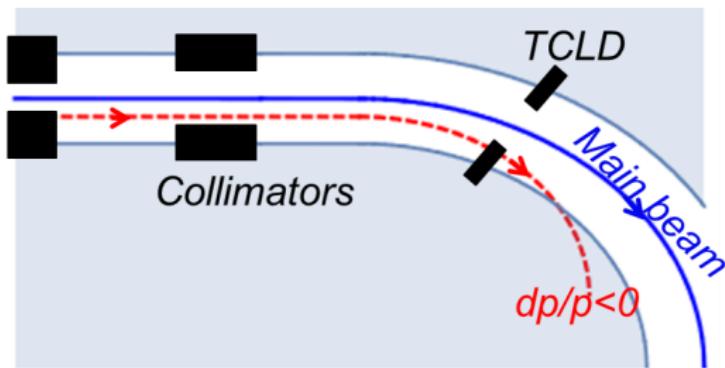


- ▶ **Collimation à plusieurs étages** (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ **Insertions de collimateurs (TCLDs)** dans les **supresseurs de dispersion** pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en **β similaire au LHC**.
- ▶ Optique de la section de collimation en énergie déduite aussi du LHC.

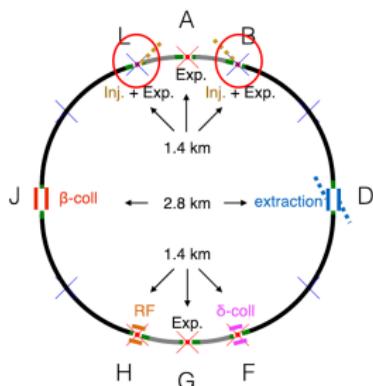
- ▶ Le système de protection fonctionne bien et les absorbeurs devraient pouvoir tenir la puissance faisceau perdue (11.6 MW).
- ▶ **Sujets futurs:** absorbeurs primaires tournés, collimation avec un cristal, utilisation de faisceaux creux d'électrons pour contrôler activement le halo, nouveaux matériaux, optique plus compacte...



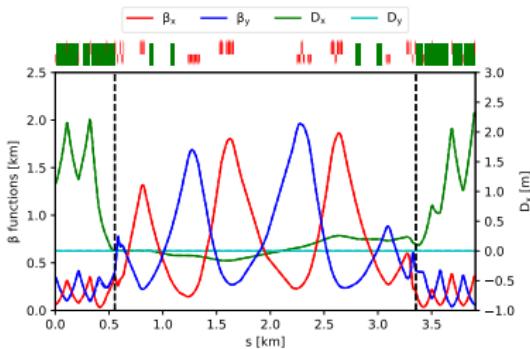
Insertions de collimateurs à l'entrée des arcs



- ▶ **Collimation à plusieurs étages** (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ **Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les suppresseurs 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...

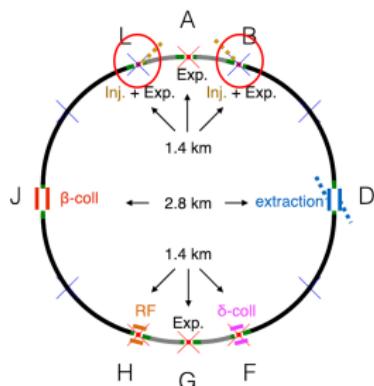


Optique Collimation β ESS-PJ-COL



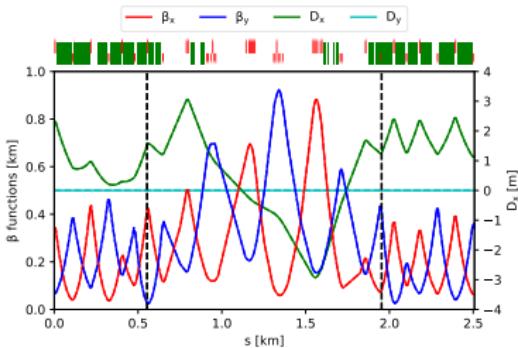
- ▶ Collimation à plusieurs étages (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les suppresseurs de dispersion pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en β similaire au LHC.
- ▶ Optique de la section 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...

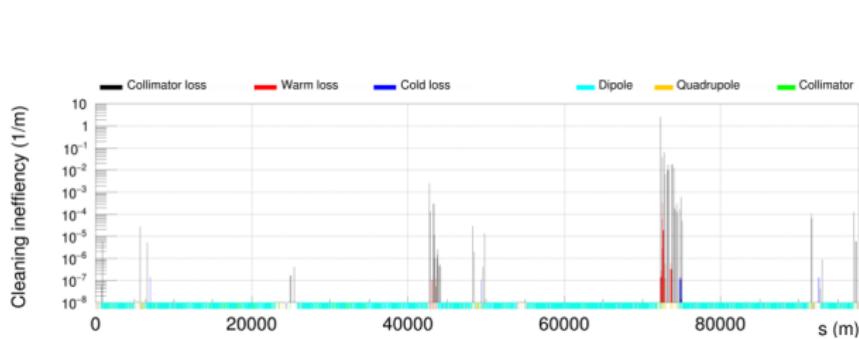
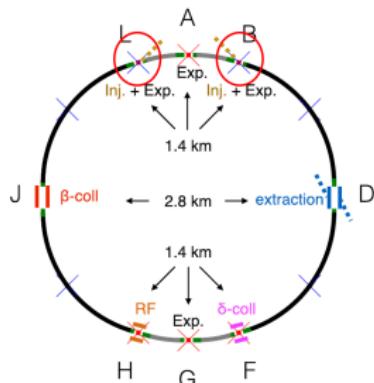


- ▶ Collimation à plusieurs étages (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les suppresseurs de dispersion pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en β similaire au LHC.
- ▶ Optique de la section de collimation en énergie déduite aussi du LHC.

Optique Collimation δ LSS-PF-COL

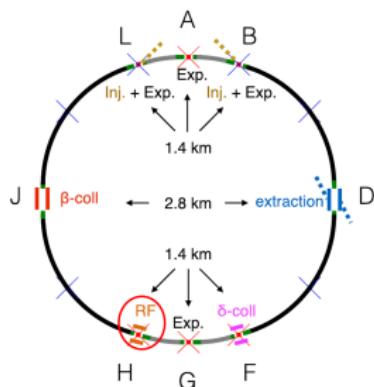


- ▶ Le système de protection fonctionne bien et les absorbeurs devraient pouvoir tenir la puissance faisceau perdue (11.6 MW).
- ▶ Sujets futurs: absorbeurs primaires tournés, collimation avec un cristal, utilisation de faisceaux creux d'électrons pour contrôler activement le halo, nouveaux matériaux, optique plus compacte...



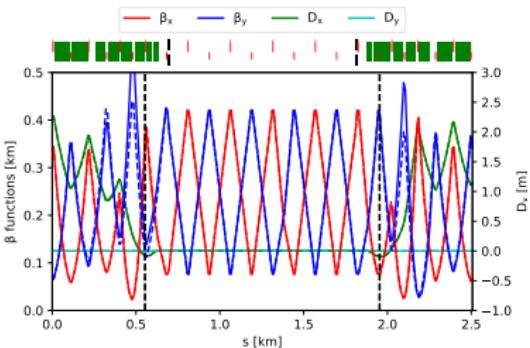
- ▶ **Collimation à plusieurs étages** (comme au LHC) pour répartir les pertes.
- ▶ **Insertions de collimateurs (TCLDs) dans les suppresseurs de dispersion** pour intercepter les particules hors-énergie (comme sur HL-LHC).
- ▶ Optique de la section de collimation en **β similaire au LHC**.
- ▶ Optique 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...

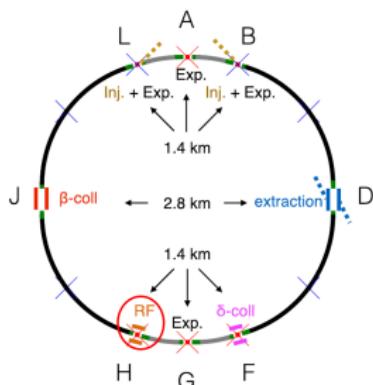


- ▶ Optique faite de mailles FODO.
- ▶ Les **contraintes sur la stabilité longitudinale** ont donné celles sur la tension RF nécessaire.
 - ▶ En fin de cycle $V_{RF} = 38 \text{ MV}$.
 - ▶ En début de cycle $\tau_{40} = 1.35 \text{ ns}$.
 - ▶ Grossissement émittance longitudinale $\propto \sqrt{E}$.

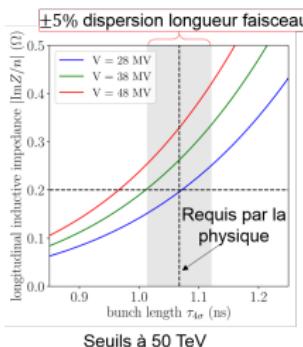
Optique section RF LSS-PH-RFS



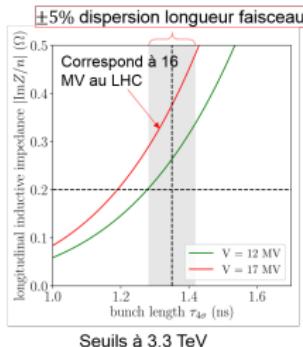
- ▶ Puissance RF calculée pour différents modes de compensation du beam-loading transitoire.
- ▶ La pleine compensation requiert une puissance pic de **600 kW** contre 400 kW sans compensation.



Seuils de stabilité



Seuils à 50 TeV

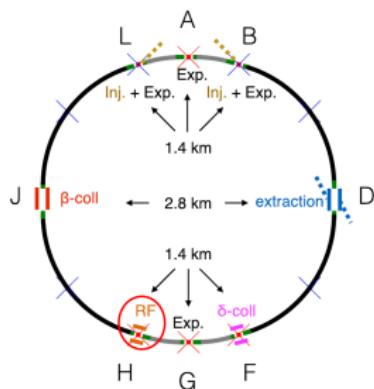


Seuils à 3.3 TeV

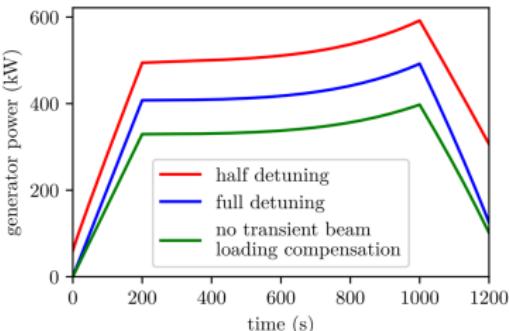
- ▶ Optique faite de mailles FODO.
- ▶ Les **contraintes sur la stabilité longitudinale** ont donné celles sur la tension RF nécessaire.
 - ▶ En fin de cycle $V_{RF} = 38$ MV.
 - ▶ En début de cycle $\tau_{4\sigma} = 1.35$ ns.
 - ▶ Grossissement émittance longitudinale $\propto \sqrt{E}$.

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

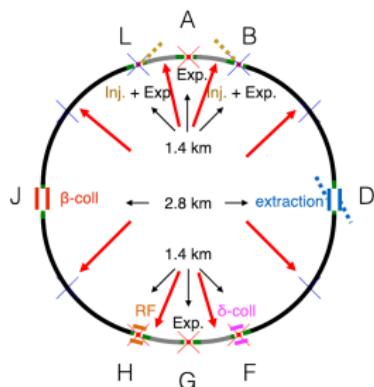
▶ La pleine compensation requiert une puissance pic de 600 kW contre 400 kW sans compensation.



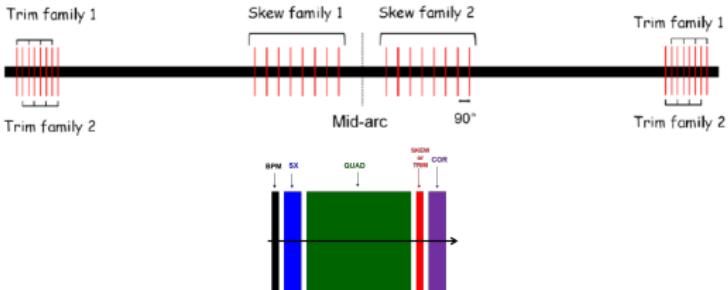
Consommation RF



- ▶ 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.



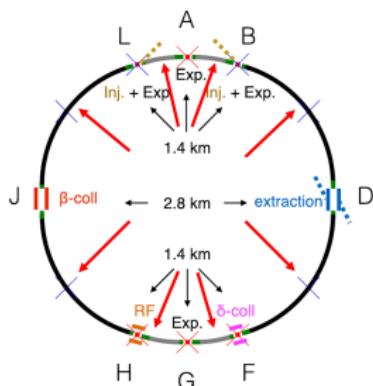
Répartition des correcteurs dans les arcs



- ▶ 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 réitérées.

- ▶ 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.**

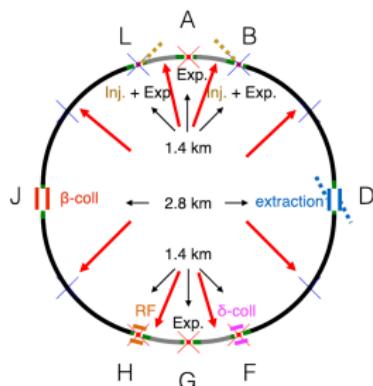


- ▶ La correction est faite en plusieurs étapes:
 - ① Correction analytique du couplage linéaire (avec les quadripôles tournés)
 - ② Correction globale de l'orbite
 - ③ Correction du nombre d'onde
 - ④ Si collision, étapes 2 et 3 réitérées.
- ▶ Erreurs résiduelles acceptables.

Valeurs résiduelles (quartile à 90%)

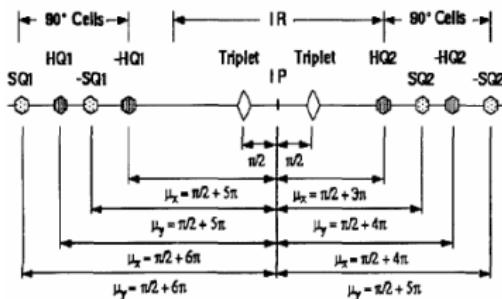
Observable	Injection	Collision
Hori. orbit	0.80 mm	0.79 mm
Vert. orbit	0.73 mm	0.73 mm
Hori. angle	26 μ rad	26 μ rad
Vert. angle	25 μ rad	27 μ rad
Hori. beta-beating	22 %	34 %
Vert. beta-beating	24 %	42 %
Hori. disp. beating	$0.023 \frac{1}{\sqrt{m}}$	$0.036 \frac{1}{\sqrt{m}}$
Vert. disp. beating	$0.028 \frac{1}{\sqrt{m}}$	$0.027 \frac{1}{\sqrt{m}}$
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

- ▶ 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.**

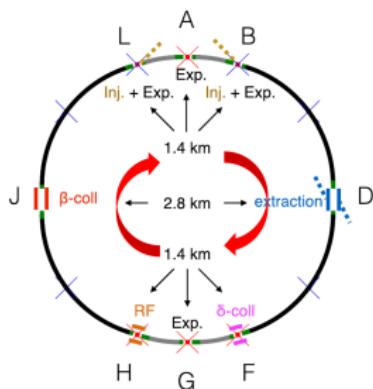


- ▶ La correction est faite en plusieurs étapes:
 - ① Correction analytique du couplage linéaire (avec les quadripôles tournés)
 - ② Correction globale de l'orbite
 - ③ Correction du nombre d'onde
 - ④ Si collision, étapes 2 et 3 réitérées.
- ▶ **Erreurs résiduelles acceptables.**

Corrections dispersion résiduelles (à la SSC)

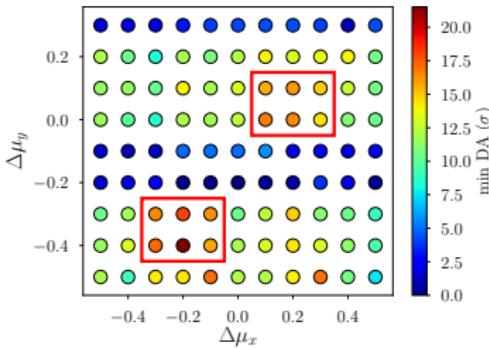


- ▶ Le battement des fonctions β et de la dispersion est encore à corriger.
- ▶ Correction de la dispersion résiduelle (due à une orbite non nulle dans le triplet d'interaction):
 - ▶ HL-LHC: orbite non nulle dans les hexapôles. Non acceptable pour FCC-hh: déplacements de 9 mm!
 - ▶ SSC: famille de 4 quadripôles (droits ou tournés) dans une zone dispersive. **Solution adoptée.**



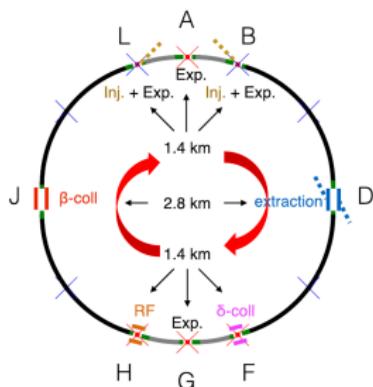
- ▶ **L'ouverture dynamique (OD) dépend** fortement de l'**avance de phase** entre les IPs A et G à la collision.
- ▶ Vrai aussi pour les interactions faisceau-faisceau et octupôles.
- ▶ Polarité négative pour les octupôles.
- ▶ **Avance de phase compatible** trouvée pour la collision.
- ▶ OD $>5\sigma$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

Ouverture dynamique avec erreurs à la collision

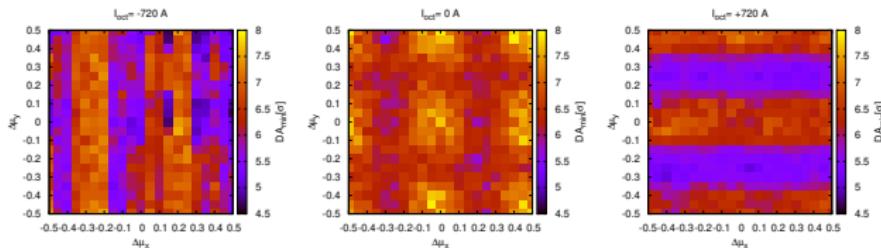


- ▶ A l'injection, l'OD est **dominée** par les **erreurs** dans les **dipôles**.
- ▶ L'OD est **inférieure à la valeur cible** avec les octupôles.
- ▶ **Valeur au-dessus des valeurs seuils** pour la collimation (comme au LHC).
- ▶ OD réduite par la dispersion en énergie du faisceau.

cea Ouverture dynamique

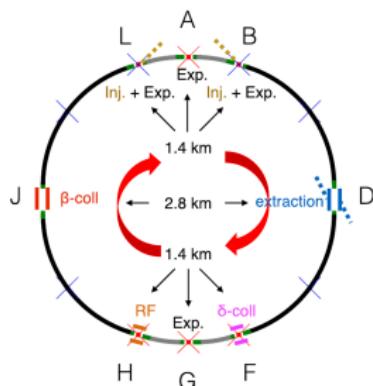


Ouverture dynamique interaction faisceau-faisceau + octupôles

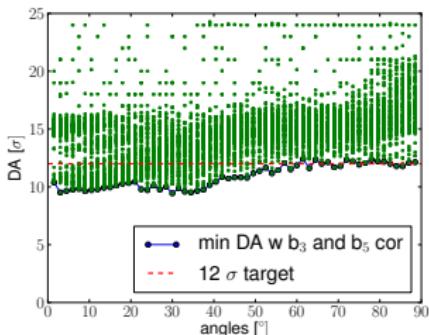


- ▶ **L'ouverture dynamique (OD) dépend** fortement de l'**avance de phase** entre les IP_s A et G à la collision.
- ▶ Vrai aussi pour les interactions faisceau-faisceau et octupôles.
- ▶ Polarité négative pour les octupôles.
- ▶ **Avance de phase compatible** trouvée pour la collision.
- ▶ OD> 5σ avec 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.

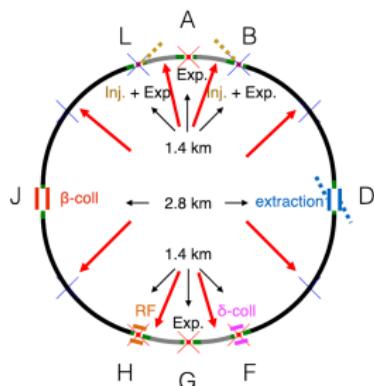


Ouverture dynamique à l'injection + erreurs + octupôles

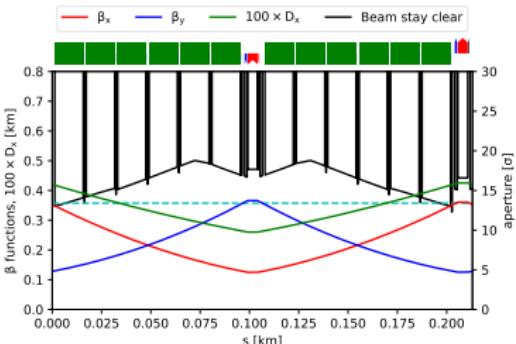


- ▶ L'ouverture dynamique (OD) dépend fortement de l'avance de phase entre les IPs A et G à la collision.
- ▶ Vrai aussi pour les interactions faisceau-faisceau et octupôles.
- ▶ Polarité négative pour les octupôles.
- ▶ Avance de phase compatible trouvée pour la collision.
- ▶ OD > 5 σ avec erreurs 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



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 (LPCN), Nicolas Delerue (LAL), Alain Savaille (GANIL), Stéphane Chel (CEA/DRF/IRFU/DACM), Brigitte Cros (LPGP), Vincent Le Flanchec (CEA/DAM), Eric Giguët (ALSYOM), Luc Perrot (IPNO)

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