

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



## Premier design du futur collisionneur à hadrons FCC-hh

Antoine CHANCE au nom de la collaboration  
FCC-hh

CEA/DSM/IRFU/SACM

Journées Accélérateurs Roscoff 2015

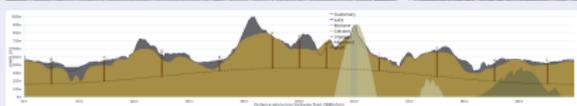
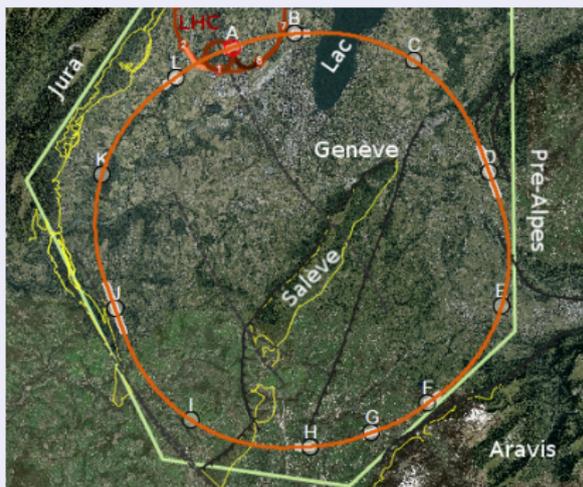
- Découverte du Higgs
- Le modèle standard est confirmé.
- Questions toujours non élucidées :
  - Masse du neutrino
  - Asymétrie matière/antimatière
  - Matière noire
  - Nouvelle physique : supersymétrie...



## 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



- Cavernes pour les détecteurs, blindage pour les arrêts faisceau,...
- 100 km paraît réalisable.

## Proton-proton : FCC-hh

- Définit les infrastructures.
- Pour 2035/2040.
- **Raison d'être de FCC.**
- Nouvelle physique.

## Électron-positron : FCC-ee

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

## Proton-électron : FCC-he

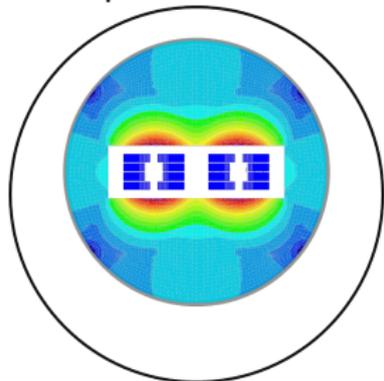
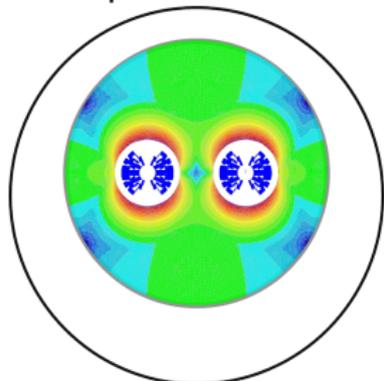
- Optionnel.
- Seulement avec FCC-ee.
- Diffusion inélastique et physique Higgs.

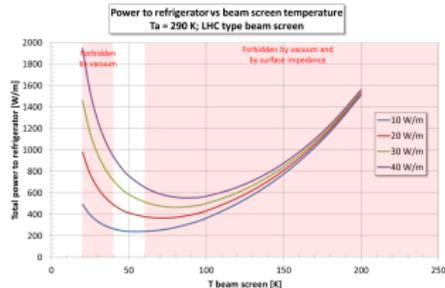
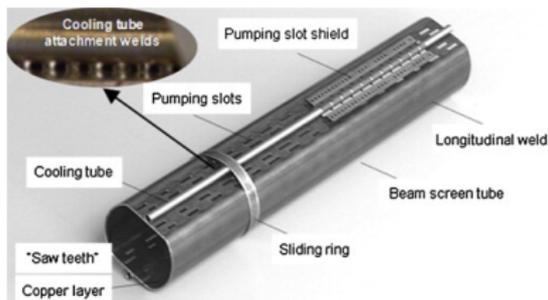
Parametre	FCC-hh (base)	FCC-hh (ultime)	LHC	HL-LHC
Énergie collision centre de masse [TeV]	100		14	
Luminosité [ $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]	5	20	1	5
Luminosité par jour [ $\text{fb}^{-1}$ ]	2	8	0.47	2.8
Distance paquets [ns]	<b>25(5)</b>	<b>25(5)</b>	25	25
Événements par collision	170(34)	680(136)	27	135
Charge paquet [ $10^{11}$ ]	1(0.2)		1.15	2.2
Énergie par faisceau [GJ]	8.4		0.392	0.694
Emittance Norm. [ $\mu\text{m}$ ]	2.2(0.44)		3.75	2.5
Longueur RMS du paquet [cm]	8		7.55	
Puissance du rayonnement synchrotron par anneau [MW]	5		0.0072	0.0146
$\beta$ au point d'interaction (IP) [m]	1.1	0.3	0.55	0.15
Taille faisceau à l'IP [ $\mu\text{m}$ ]	6.8(3)	3.5(1.6)	16.7	7.1
Maximum tune-shift pour 2 IPs [ $10^{-2}$ ]	1(2)	3	0.68	1.2
Angle de croisement	74 $\mu\text{rad}$	Cavité crabe	285 $\mu\text{rad}$	590 $\mu\text{rad}$

125 jours effectifs par an (en tenant compte des arrêts, maintenances, ...)

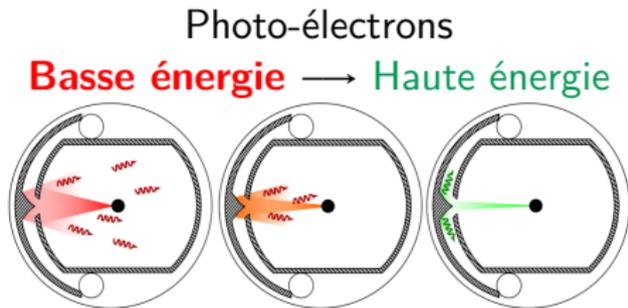
- Besoin de dipôles de **16 T**.
- Principaux contributeurs au coût.
- Conducteurs en  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ .
- Un grand nombre de contraintes :
  - Longueur, poids et coût.
  - Ouverture.
  - Séparation des 2 chambres.
  - Qualité de champ.
  - Comportement en cas de transition.
  - Protection de l'aimant.

Dipôle en blocs

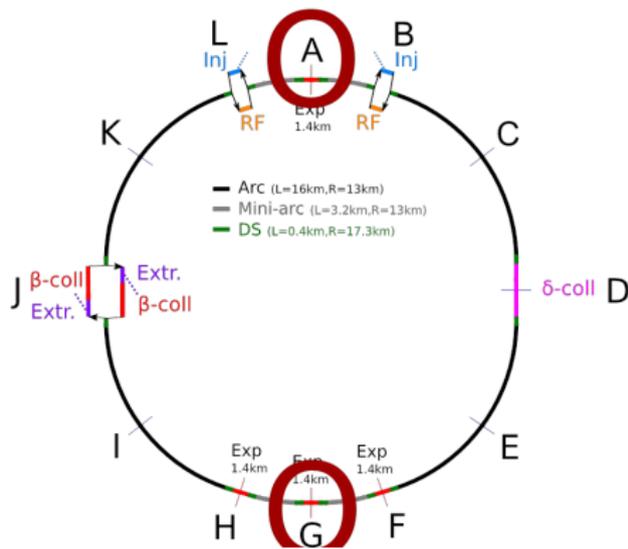
Dipôle en  $\cos\theta$ 



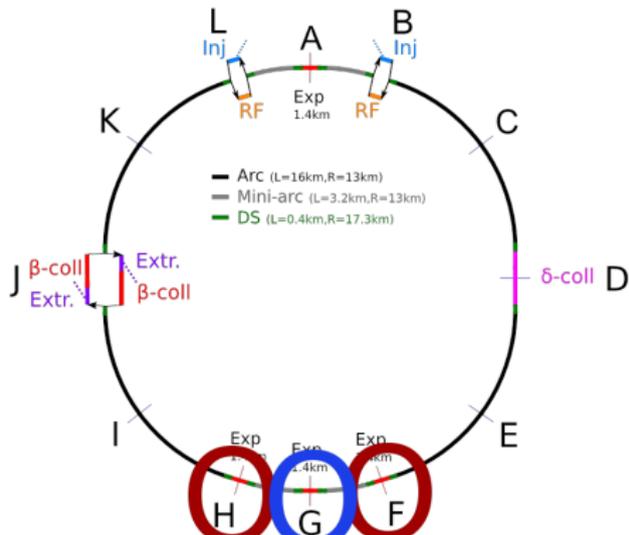
- Rayonnement synchrotron :
  - $\approx 30$  W/m/faisceau/arc
  - ⇒ Total de **5 MW** (LHC 7 kW)
- Un grand nombre de défis :
  - Puissance de **100 MW** pour le refroidissement (à 50 K)
  - Vide
  - Impédance
  - Mécanique
  - Electron cloud
  - Coût



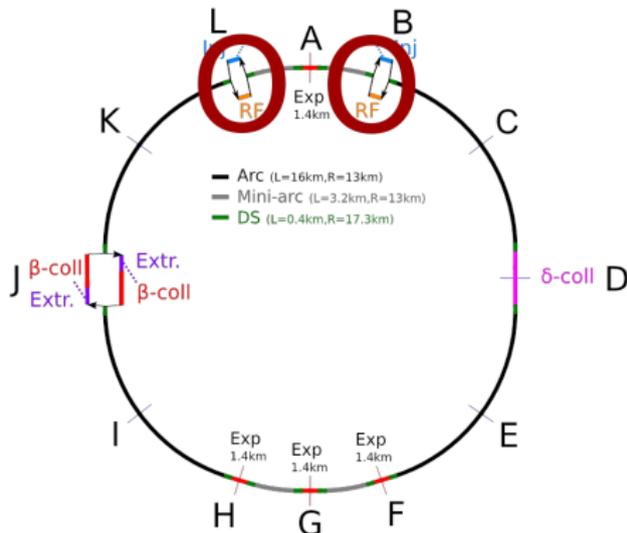
- 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas  $\beta$ ) : A et G.
- 2 régions d'interaction à plus basse luminosité disposées en cluster : F et H.
- 2 insertions pour l'injection et la RF : L et B.
- 2 insertions pour la collimation et extraction : D et J.
- Collimation après extraction pour protéger l'anneau de faisceaux mal extraits.
- Autres scénarios à l'étude (ici : extraction des 2 faisceaux dans la même section).



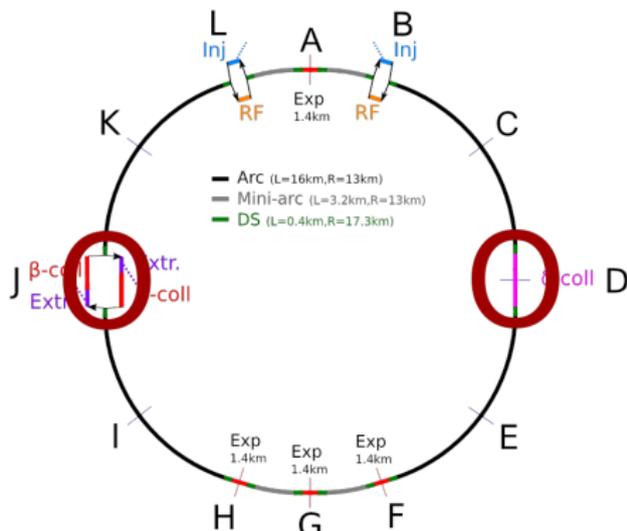
- 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas  $\beta$ ) : A et G.
- 2 régions d'interaction à plus basse luminosité disposées en cluster : F et H.
- 2 insertions pour l'injection et la RF : L et B.
- 2 insertions pour la collimation et extraction : D et J.  
Collimation après extraction pour protéger l'anneau de faisceaux mal extraits.
- Autres scénarios à l'étude (ici : extraction des 2 faisceaux dans la même section).



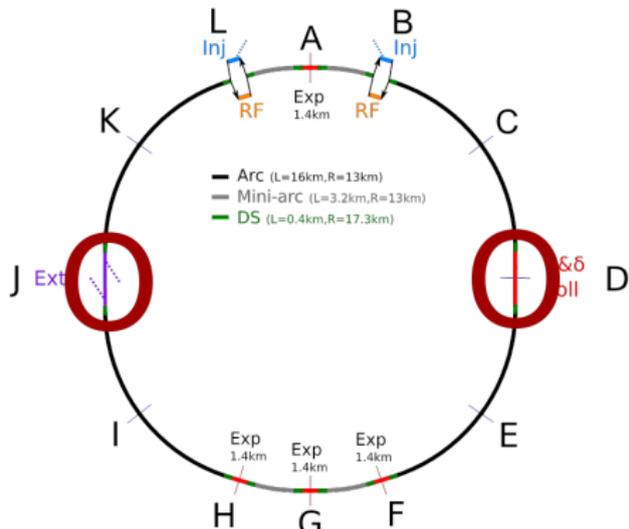
- 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas  $\beta$ ) : A et G.
- 2 régions d'interaction à plus basse luminosité disposées en cluster : F et H.
- 2 insertions pour l'injection et la RF : L et B.
- 2 insertions pour la collimation et extraction : D et J.  
Collimation après extraction pour protéger l'anneau de faisceaux mal extraits.
- Autres scénarios à l'étude (ici : extraction des 2 faisceaux dans la même section).



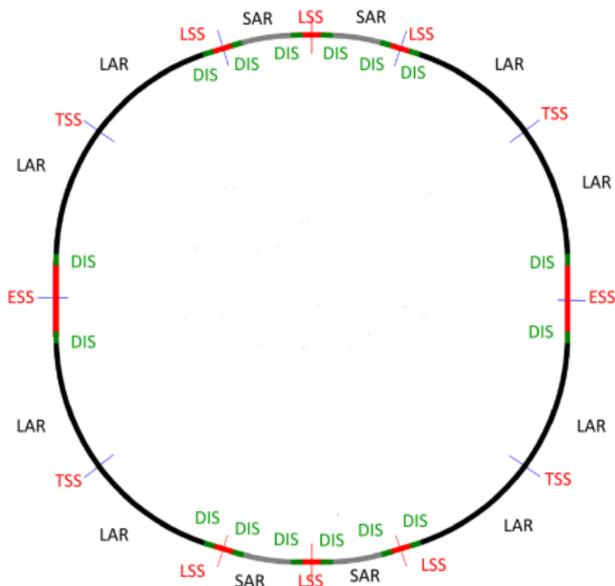
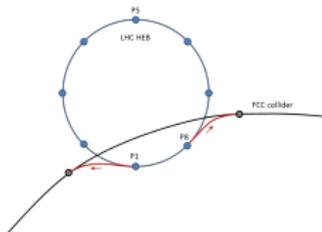
- 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas  $\beta$ ) : A et G.
- 2 régions d'interaction à plus basse luminosité disposées en cluster : F et H.
- 2 insertions pour l'injection et la RF : L et B.
- 2 insertions pour la collimation et extraction : D et J.  
Collimation après extraction pour protéger l'anneau de faisceaux mal extraits.
- Autres scénarios à l'étude (ici : extraction des 2 faisceaux dans la même section).



- 2 régions d'interaction à haute luminosité (bas  $\beta$ ) : A et G.
- 2 régions d'interaction à plus basse luminosité disposées en cluster : F et H.
- 2 insertions pour l'injection et la RF : L et B.
- 2 insertions pour la collimation et extraction : D et J.  
Collimation après extraction pour protéger l'anneau de faisceaux mal extraits.
- Autres scénarios à l'étude (ici : extraction des 2 faisceaux dans la même section).



- Longueurs des insertions estimées depuis celles du LHC  
 fois  $\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_0}} = \sqrt{\frac{50}{7}} \approx 2.67$ .
- Longueur SAR pour injecter depuis le LHC.

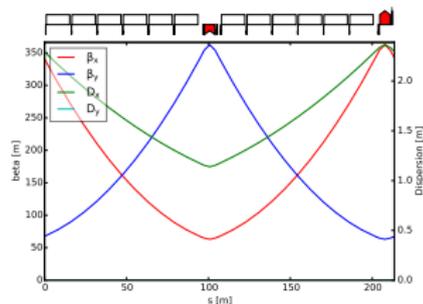
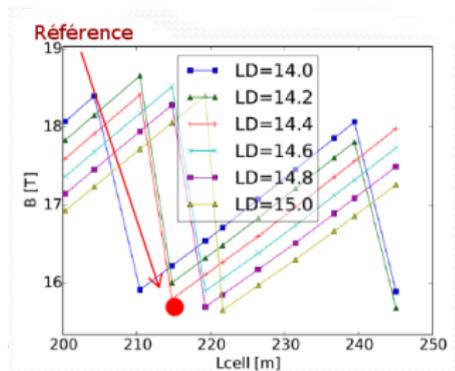


Type	Signification	Nombre	Longueur
LSS	Long straight section	6	1.4 km
ESS	Extended straight section	2	4.2 km
TSS	Technical straight section	4	$\epsilon$
DIS	Dispersion suppressor	16	0.4 km
SAR	Short arc	4	3.2 km
LAR	Long arc	4	16 km

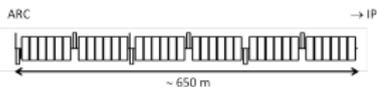
- Un outil automatique en python a été écrit pour générer l'anneau pour MAD-X :
  - Séquences des arcs.
  - Séquences des supprimeurs de dispersion.
  - Génération automatique de macros pour adapter aux section d'insertion.

## Paramètres

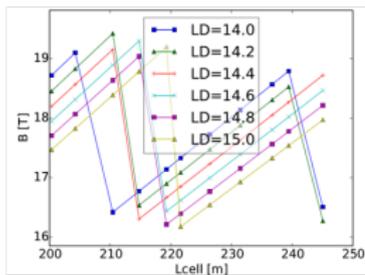
- Circonférence  $3.75 \times \text{LHC} \approx 100 \text{ km}$ .
- Champ maximum dipôle : 16 T.
- Longueur magnétique : 14.3 m.
- Avance de phase par cellule :  $90^\circ$ .
- Gradient maximal du QPôle : 370 T/m.
- $\varnothing = 50 \text{ mm}$  (dû au tube faisceau).
- Distance dipôle-dipôle : 1.36 m.
- Distance min. QPôle-dipôle : 3.67 m.
- Distance QPôle-sextupôle : 1.0 m.



### Dipôle à moitié du champ

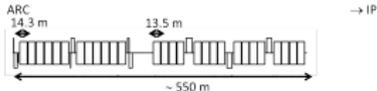


baseline

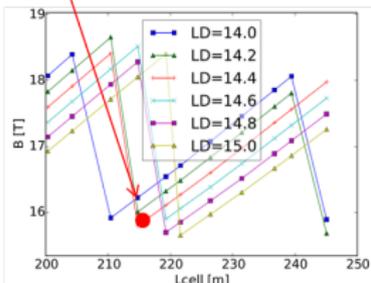


Pas de solution en dessous de 16 T

### Schéma similaire au LHC

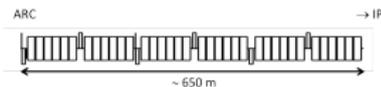


baseline

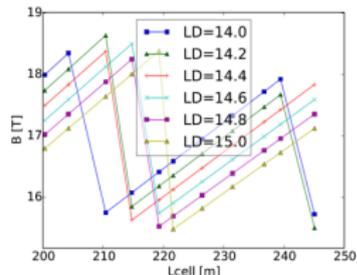


2 longueurs différentes de dipôles

### Dipôle à plein champ

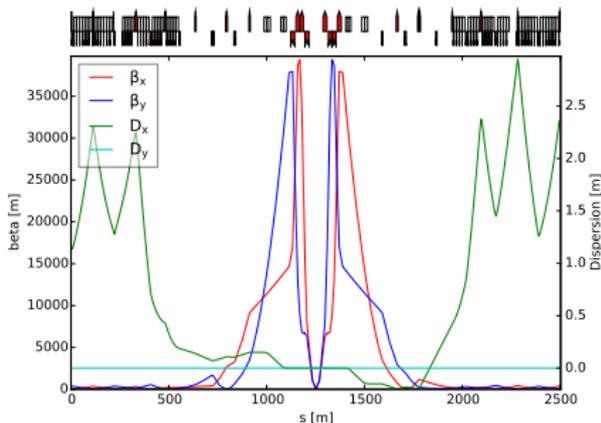


baseline



Champ inférieur de 1% par rapport au schéma à la LHC

- Longueur allouée consistante avec la performance requise.
- Distance IP-triplet :  $L^* = 36$  m (place pour le détecteur).
- $\beta = 0.3$  m atteint à l'IP.
- Ouverture (en nombre de  $\sigma$ ) au triplet plus faible que HL-LHC.
  - Fonction  $\beta$  plus grande.
  - Plus de blindage.
  - ⇒ Système de collimation.
- Le rayonnement de l'IP au triplet final doit être absorbé
  - 100 kW à 400 kW + débris liés aux collisions.



- Collimation multi-étagée héritée du système utilisé au LHC.
- Adaptation à une ouverture réduite aux triplets des zones expérimentales.
- Les secondaires produits lors des collisions avec les collimateurs primaires seront beaucoup plus difficiles à collecter :
  - Plus petits angles de diffusion.
  - Plus d'énergie dans les cascades.
- L'optique de l'insertion est celle de HL-LHC avec le facteur d'échelle.

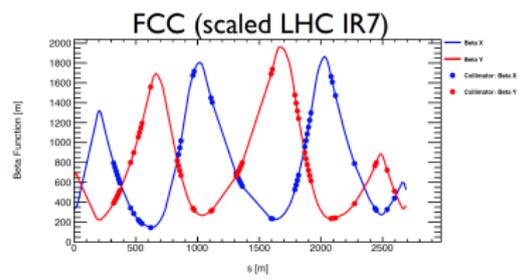
$$r_c = (50 \text{ TeV} / 7 \text{ TeV})^{1/2} \times 0.4 \text{ m} / 0.3 \text{ m} \times (59 \text{ mm} / 49 \text{ mm})^2$$

$$r_c \approx 5.2 \approx 2r$$

$$\Rightarrow L_c = 2.8 \text{ km}$$

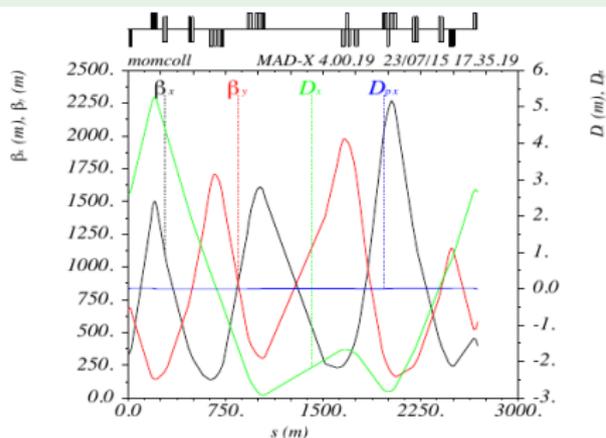
**Facteur d'échelle**  $r = \sqrt{\gamma/\gamma_0}$   
**Rapport des  $\beta$**  (et donc des  $\beta$  au triplet)  
**Réduction d'ouverture due au blindage**

- Efficacité de la ligne encore à évaluer (notamment sur les secondaires).

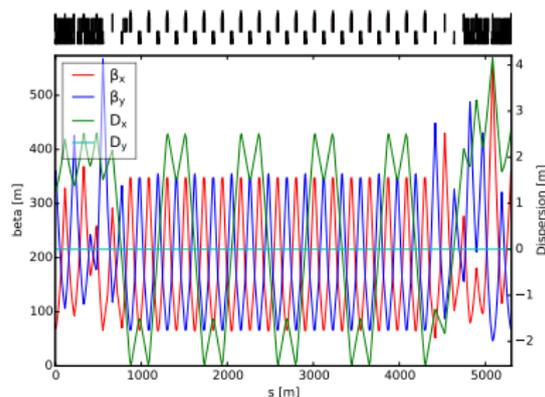


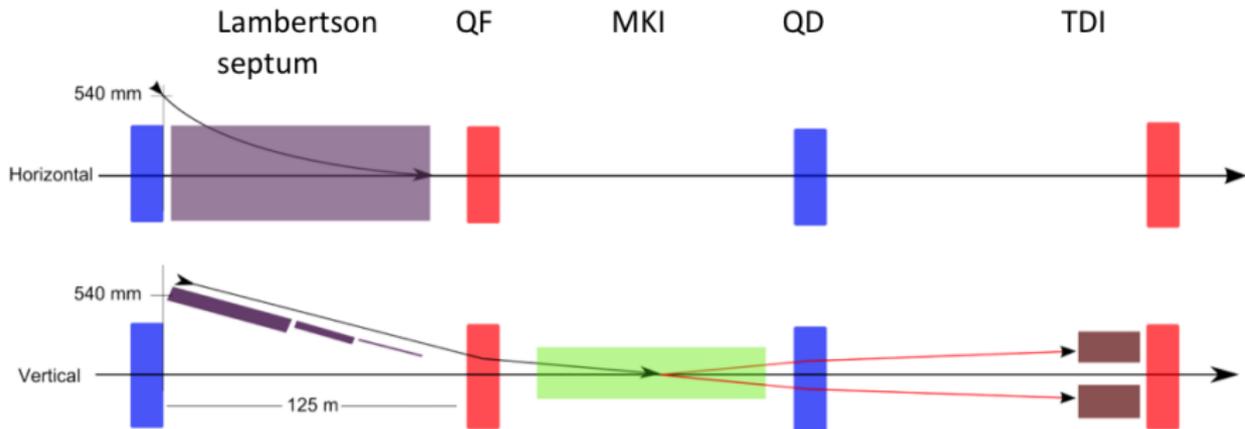
- La dispersion en énergie du faisceau dans FCC-hh est supposée similaire à celle dans le LHC.
- Plusieurs versions à l'étude.
- L'efficacité de la collimation reste à étudier.

## à la LHC



## Mailles FODO





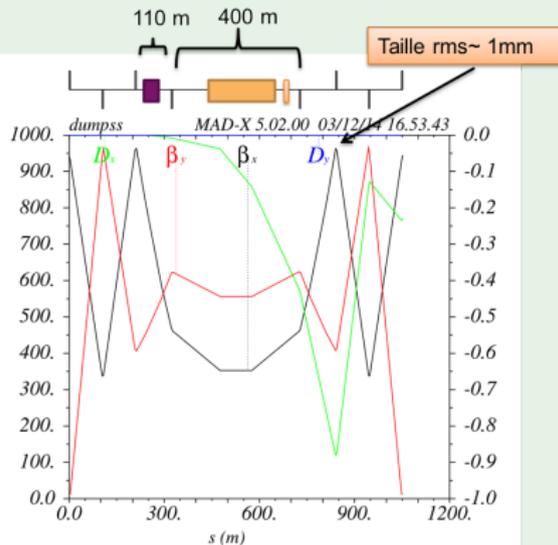
- Un septum permanent pour dévier horizontalement le faisceau.
- Un déviateur rapide (MKI) pour dévier verticalement.
- ⚠ Protection nécessaire en cas de panne de MKI.

	LHC	FCC-hh
Angle déviation [mrad]	0.85	0.29
Champ intégré [T.m]	1.3	3.2
Longueur MKI [m]	10.6	>120
Temps de montée [ns]	900	280

- Un des grands défis.
  - Perte faisceau sur le septum et éléments de l'insertion lors de la sortie du faisceau en cas d'erreur.
- Trois schémas à l'étude.
  - Plus d'études nécessaires pour les cas de pannes.
- Plus d'espace serait bénéfique.
  - Combinaison avec le système de collimation à l'étude.

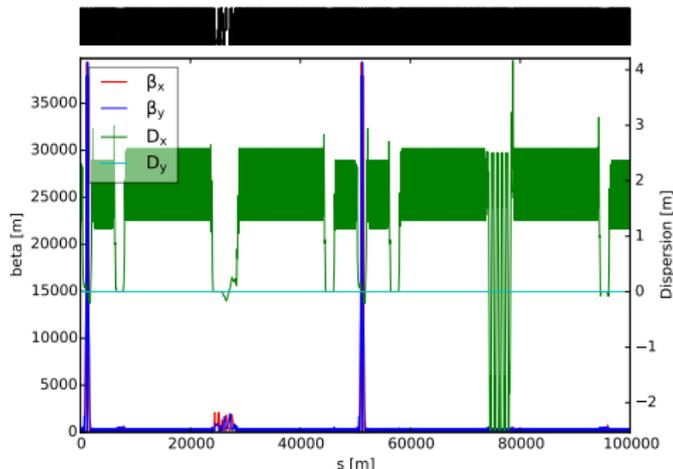
## Une extraction possible

Extraction similaire au LHC :



Paramètre		Valeur
Énergie	TeV	50
$\gamma$	-	53289
Circonférence	km	99970.6
$\alpha$	$10^{-4}$	1.117
$\gamma_{tr}$	-	94.598
$Q_x$	-	108.31
$Q_y$	-	108.32

- Avance de phase de  $90^\circ$  dans les arcs courts.
- Avance de phase de  $90^\circ + \epsilon_{x,y}$  dans les arcs longs pour ajuster le nombre d'onde de la machine.

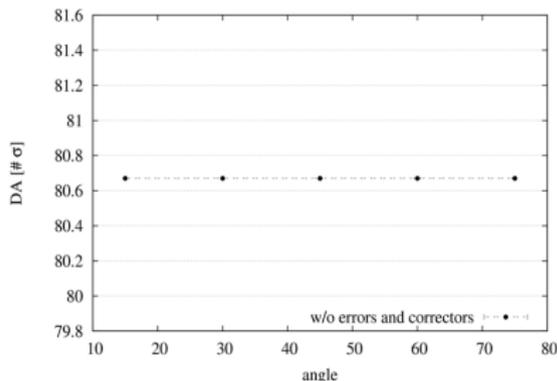


- Énergie d'injection 3.3 TeV
- Emittance normalisée  $2.2 \times 10^{-6}$  m
- $\delta p/p=0.00075$  (LHC)

Table erreurs ( $r_{ref} = 17$  mm)

Normal	Injection		Uncertainty		Random	
	High Field	High Field	Injection	High Field	Injection	High Field
2	0.000	0.000	0.484	0.484	0.484	0.484
3	-5.000	20.000	0.781	0.781	0.781	0.781
4	0.000	0.000	0.065	0.065	0.065	0.065
5	-1.000	-1.500	0.074	0.074	0.074	0.074
6	0.000	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009
7	-0.500	1.300	0.016	0.016	0.016	0.016
8	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
9	-0.100	0.650	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Skew						
2	0.000	0.000	1.108	1.108	1.108	1.108
3	0.000	0.000	0.256	0.256	0.256	0.256
4	0.000	0.000	0.252	0.252	0.252	0.252
5	0.000	0.000	0.050	0.050	0.050	0.050
6	0.000	0.000	0.040	0.040	0.040	0.040
7	0.000	0.000	0.007	0.007	0.007	0.007
8	0.000	0.000	0.007	0.007	0.007	0.007
9	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Pas d'erreur



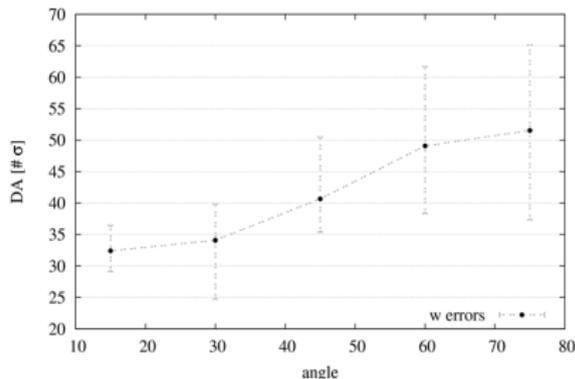
L'environnement sixdesk et le code SixTrack ont dû être modifiés (plus de 400000 éléments !)

- Énergie d'injection 3.3 TeV
- Emittance normalisée  $2.2 \times 10^{-6}$  m
- $\delta p/p = 0.00075$  (LHC)

Table erreurs ( $r_{ref} = 17$  mm)

Normal	Injection		High Field		Uncertainty		Random	
	Injection	High Field	Injection	High Field	Injection	High Field	Injection	High Field
2	0.000	0.000	0.484	0.484	0.484	0.484	0.484	0.484
3	-5.000	20.000	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781
4	0.000	0.000	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
5	-1.000	-1.500	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074
6	0.000	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
7	-0.500	1.300	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
8	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
9	-0.100	0.650	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Skew								
2	0.000	0.000	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108
3	0.000	0.000	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256
4	0.000	0.000	0.252	0.252	0.252	0.252	0.252	0.252
5	0.000	0.000	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
6	0.000	0.000	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
7	0.000	0.000	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
8	0.000	0.000	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
9	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

$b_3, b_5, b_7, b_9$  : systématique et aléatoire



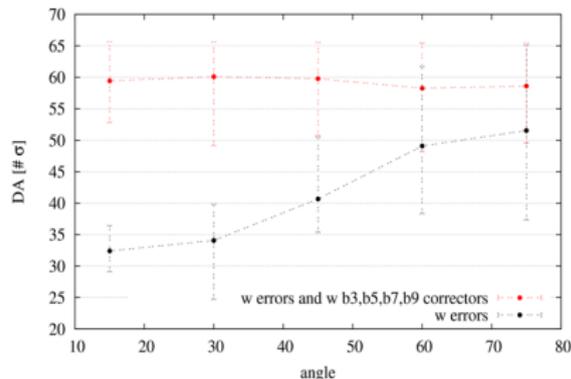
L'environnement sixdesk et le code SixTrack ont dû être modifiés (plus de 400000 éléments !)

- Énergie d'injection 3.3 TeV
- Emittance normalisée  $2.2 \times 10^{-6}$  m
- $\delta p/p = 0.00075$  (LHC)

Table erreurs ( $r_{ref} = 17$  mm)

Normal	Injection		High Field		Uncertainty		Random	
	Injection	High Field	Injection	High Field	Injection	High Field	Injection	High Field
2	0.000	0.000	0.484	0.484	0.484	0.484	0.484	0.484
3	-5.000	20.000	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781
4	0.000	0.000	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
5	-1.000	-1.500	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074	0.074
6	0.000	0.000	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
7	-0.500	1.300	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
8	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
9	-0.100	0.650	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Skew								
2	0.000	0.000	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108
3	0.000	0.000	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256
4	0.000	0.000	0.252	0.252	0.252	0.252	0.252	0.252
5	0.000	0.000	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
6	0.000	0.000	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
7	0.000	0.000	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
8	0.000	0.000	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
9	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

$b_3, b_5, b_7, b_9$  : systématique corrigé et aléatoire



L'environnement sixdesk et le code SixTrack ont dû être modifiés (plus de 400000 éléments !)

- Une circonférence de 100 km et des dipôles de 16 T sont nécessaires pour des collisions à 100 TeV cm.
- Les arcs ont été optimisés pour être le plus compact possible.
- Une première version des insertions existe.
- L'intégration des différentes insertions s'est faite.
- De premières études d'ouverture dynamique ont démarré.
- Mais encore beaucoup de travail pour la suite.

- 
- A large, solid blue arrow pointing downwards is positioned on the left side of the slide, indicating a flow or continuation of the content.
- Beaucoup de travail reste à venir sur l'optique...
    - Étudier les options pour les différentes insertions.
    - Compléter l'intégration des insertions et réserver de la place pour les sous-systèmes.
    - Explorer l'ensemble des points de fonctionnement.
    - Schémas de correction de la chromaticité.
    - Ouverture dynamique et tolérances des aimants.
    - Ré-optimiser les différentes sections.
  - Beaucoup de R&D.
    - Aimants
    - Tube faisceau.
    - Triplet final (similaire à HL-LHC).
    - Dynamique faisceau.
    - Boucles de rétroaction.
    - Protection machine et fiabilité.
    - ...
- 
- A large, solid blue arrow that curves from the top right towards the bottom right is positioned on the right side of the slide, suggesting a return or a continuation of the process.

- Merci à ceux dont j'ai emprunté les résultats des transparents (liste non exhaustive).
  - W. Bartmann
  - B. Dalena
  - M. Fiascaris
  - B. Holzer
  - A. Lachaize
  - R. Martin
  - J. Payet
  - F. Petrov
  - D. Schulte
  - E. Todesco
  - R. Tomas

