

Physique des ions lourds ultra-relativistes : étude du plasma de quarks et de gluons

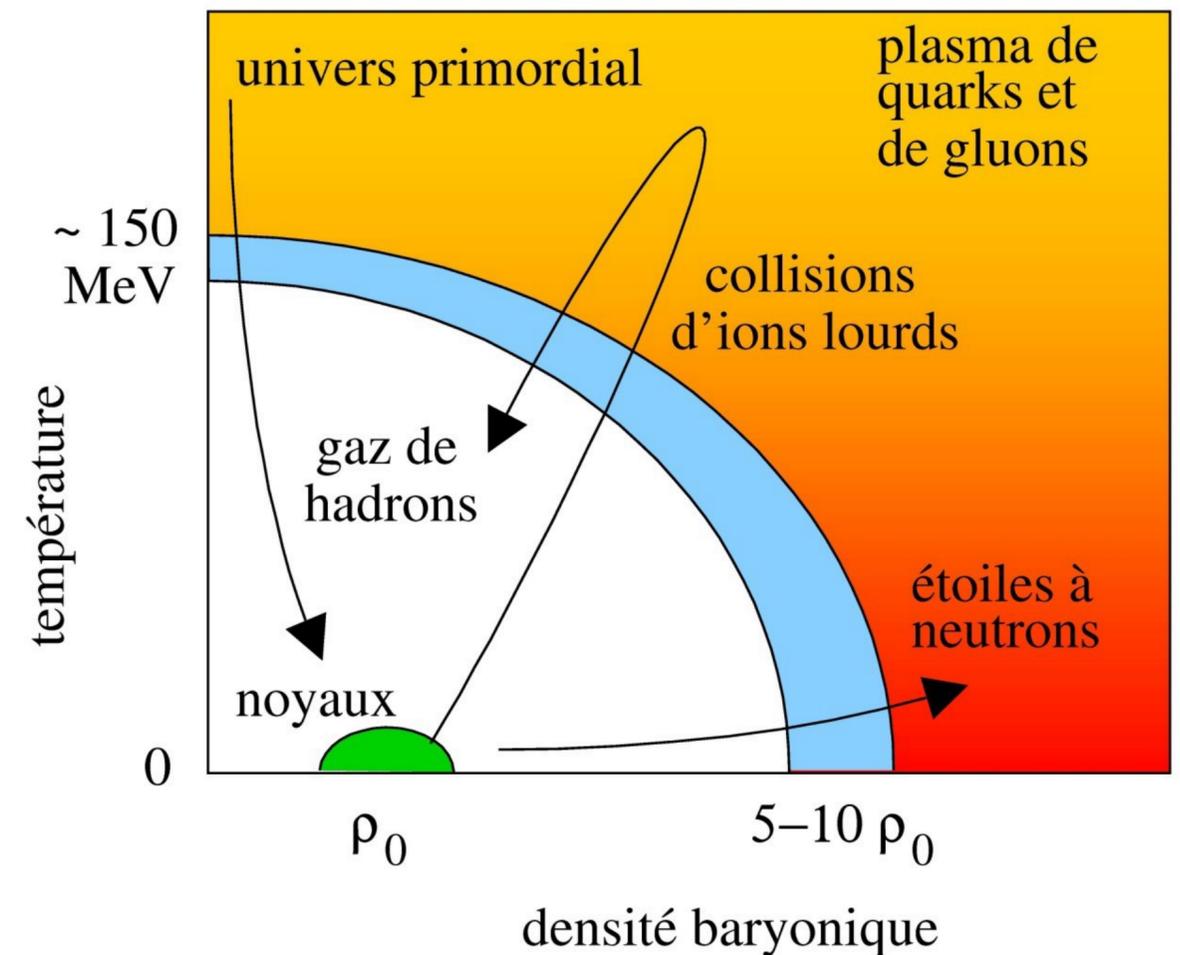
De la Physique au Détecteur
École thématique in2p3
24 novembre - 29 novembre 2024
Fréjus - France

Cynthia Hadjidakis
IJCLab (Orsay)

Récapitulatifs du 1^{er} cours

- Les hadrons sont des objets extrêmement complexes
 - hadrons = quarks et gluons
 - gluons = médiateurs de l'interaction forte
 - l'interaction forte est décrite par la chromodynamique quantique (QCD)
- Le plasma de quarks et de gluons (QGP) est un état de la matière nucléaire obtenu à haute densité / température
 - prédit par la QCD
 - important pour étudier les propriétés de l'interaction forte (confinement)
 - lien avec la cosmologie / astrophysique
- Les collisions d'ions lourds ultra-relativistes permettent de produire le QGP
 - plusieurs signatures du QGP prédites par les approches théoriques

Diagramme de phase de la matière nucléaire

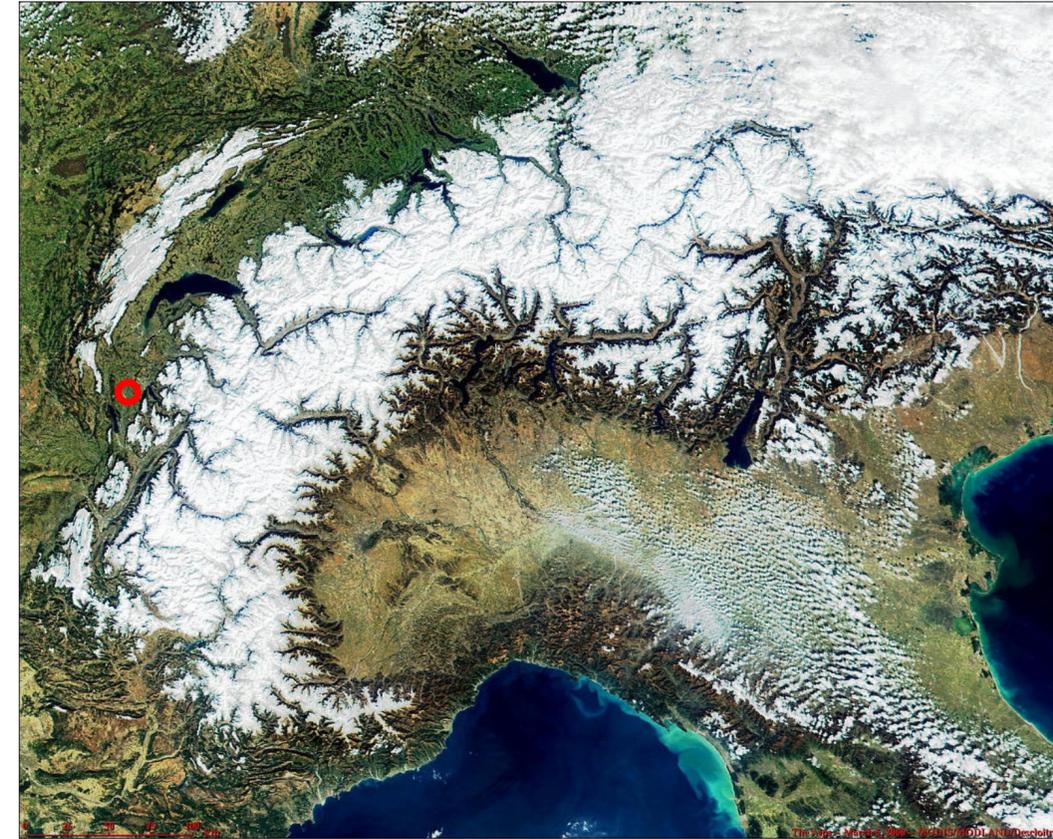
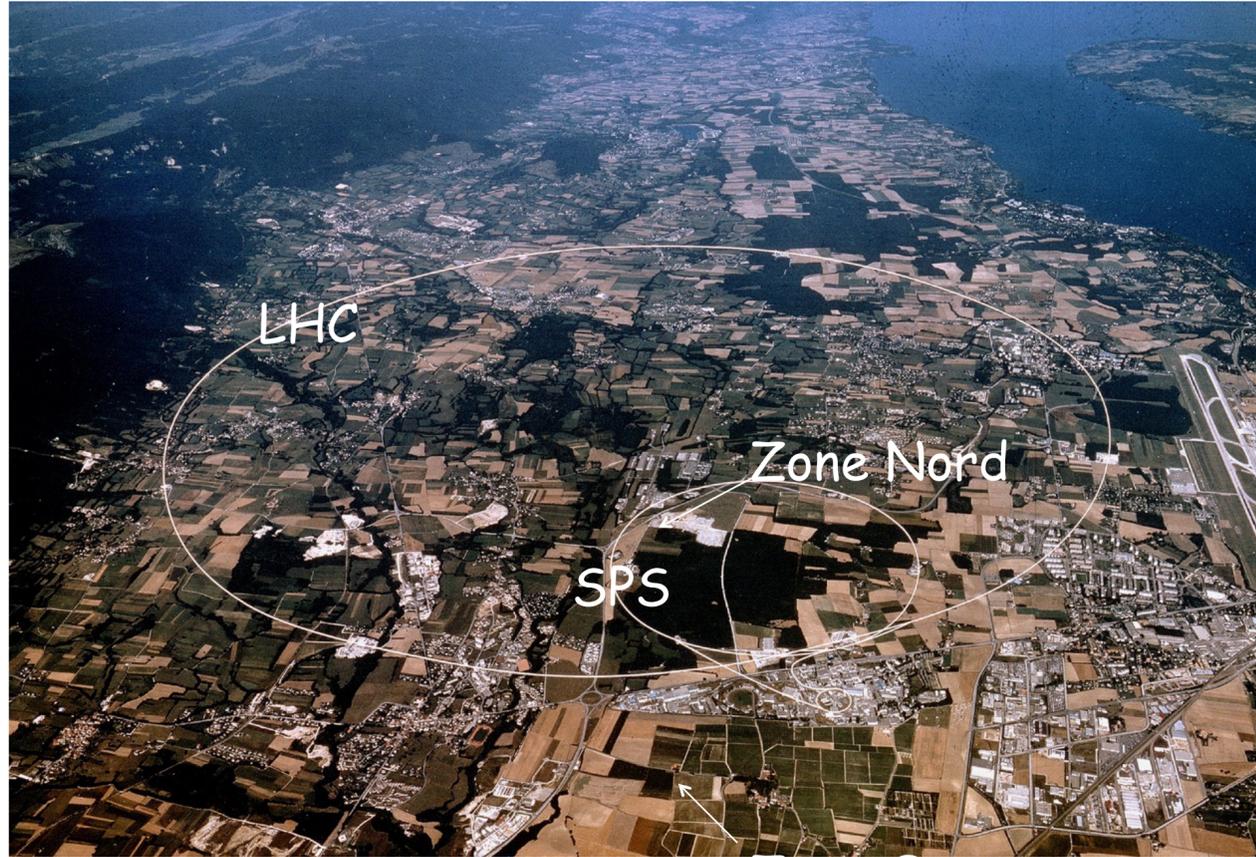


Quels instruments pour recréer et observer le QGP ? (deuxième cours)

Sommaire

- I. Matière nucléaire et le plasma de quarks et de gluons (QGP)
 - 1. Notions fondamentales et interaction forte
 - 2. Les phases de la matière nucléaire et le QGP
 - 3. Sonder le QGP en laboratoire
- II. De la physique au détecteur
 - 1. Les accélérateurs d'ions lourds ultra-relativistes
 - 2. Expériences passées et présentes
 - 3. L'expérience ALICE et le spectromètre à muons
 - 4. La vie d'un(e) physicien(ne) sur une expérience
- III. Résultats et expériences futures
 - 1. Des données aux résultats
 - 2. Des résultats (une sélection) à la théorie
 - 3. Upgrade et expériences futures

Le CERN



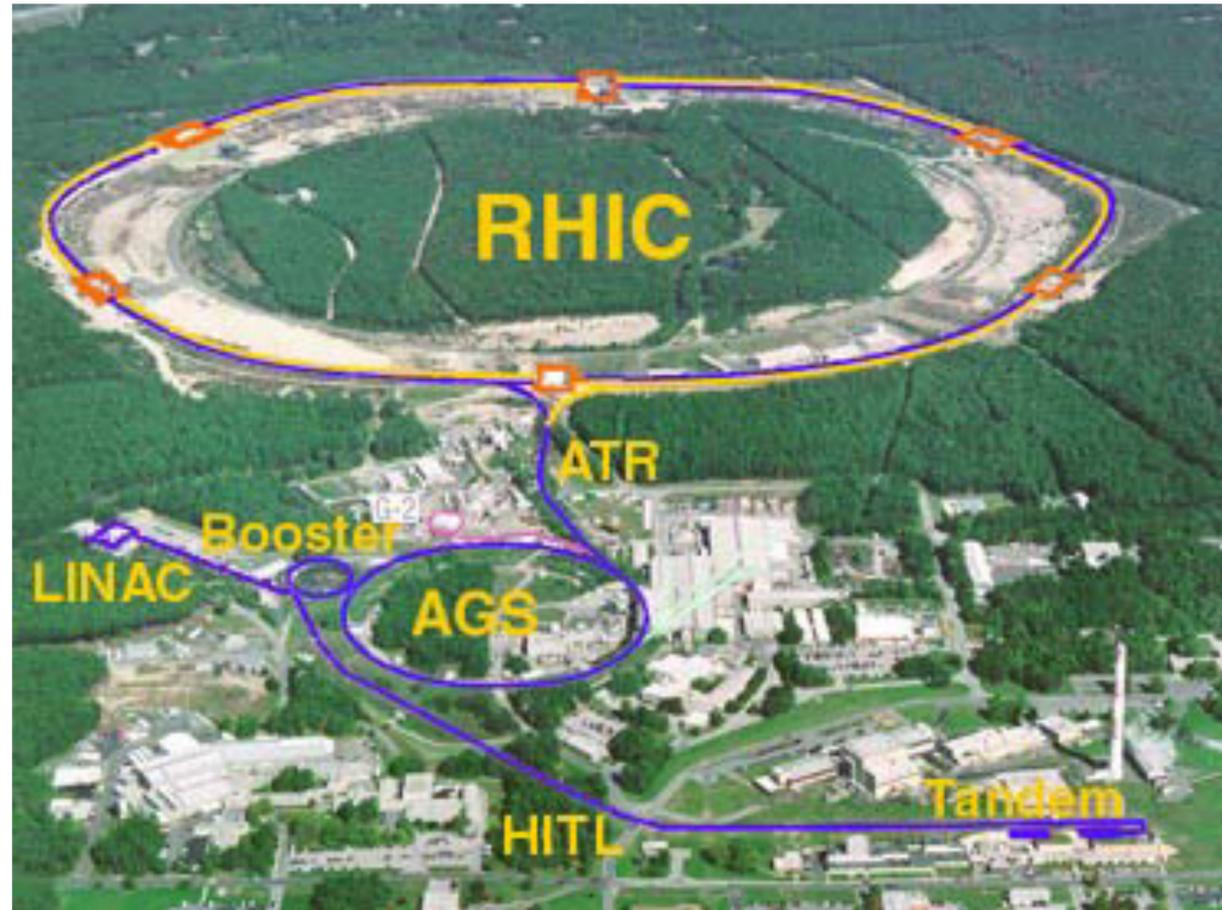
SPS (cible fixe) :

- 6.3 km de circonférence, injecteur du LHC
- énergie du faisceau de Pb jusqu'à 158 A.GeV, de protons jusqu'à 450 GeV
- 2 sites expérimentaux, 7 expériences ions lourds, mise en service : 1976

LHC (collisionneur) :

- circonférence : 27 km, profondeur moyenne : 100 mètres, ~9300 aimants
- énergie de faisceau : 2.76 A.TeV Pb (A = 208), Xe (A = 129)/ 7 TeV proton (= 99.9999991 % de la vitesse de la lumière)
- 4 expériences principales, mise en service : 2008

Brookhaven National Laboratory (BNL)



RHIC : collisionneur spécialement dédié à la mise en évidence et à l'étude du QGP

- 1740 aimants supraconducteurs, 3.8 km de circonférence
- accélère protons 30-250 GeV, Au 3-100 A.GeV mais aussi d, Al, Cu, U, Zr et Ru
- 6 points d'interaction, 4 expériences ions lourds, mise en service : 2000

Du SPS au LHC : collisions d'ions lourds ultra-relativistes

SPS@CERN – Cible fixe – années 80-90
pp, pA, SU, OU, InIn, PbPb

$\sqrt{s_{NN}} \approx 20 \text{ GeV}$

$\sqrt{s_{NN}}$: énergie de la collision par paire de nucléons (AxB en collisions AB)

x 10

RHIC@BNL – Collisionneur – 2000-...
dAu, CuCu, AuAu, CuAu, UU, ...

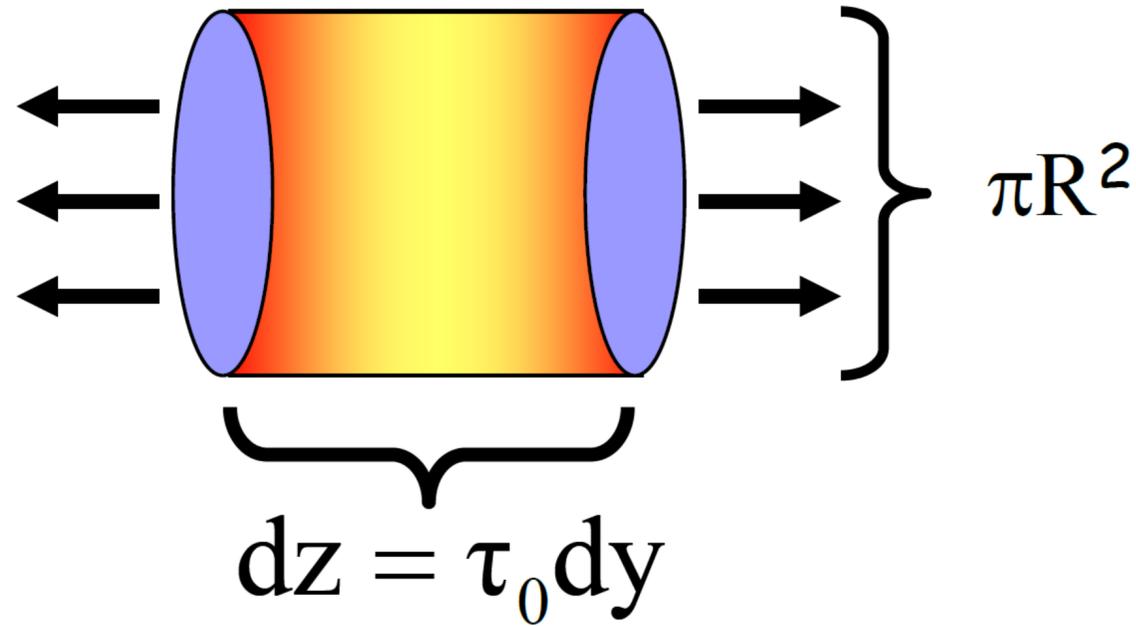
$\sqrt{s_{NN}} = 7 \dots 200 \text{ GeV}$

x ~25

LHC@CERN – Collisionneur – 2010-...
pp, pPb, PbPb, XeXe

$\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \dots 5.36 \text{ TeV}$

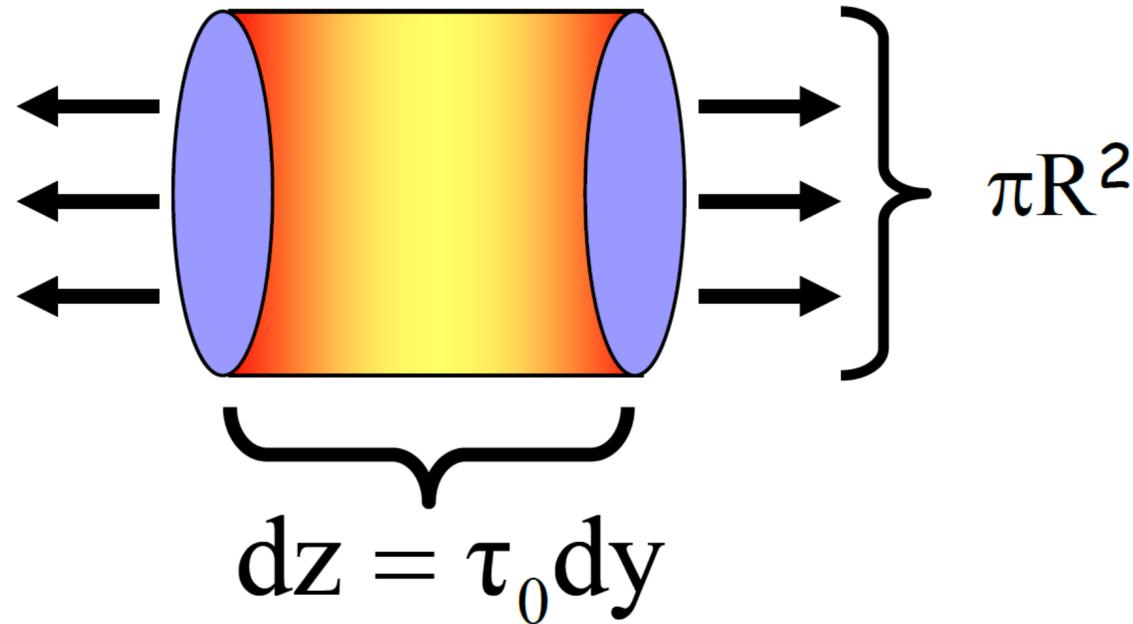
Densité d'énergie



Densité d'énergie atteinte dans les collisions d'ions lourds ultra-relativistes : scénario d'expansion de Bjorken

$$\text{Density} = \frac{\text{Energy}}{\text{Volume}}$$

Densité d'énergie



Densité d'énergie atteinte dans les collisions d'ions lourds ultra-relativistes : scénario d'expansion de Bjorken

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi R^2 \tau_0} \frac{dE_T}{dy}$$

E_T : énergie transverse mesurée

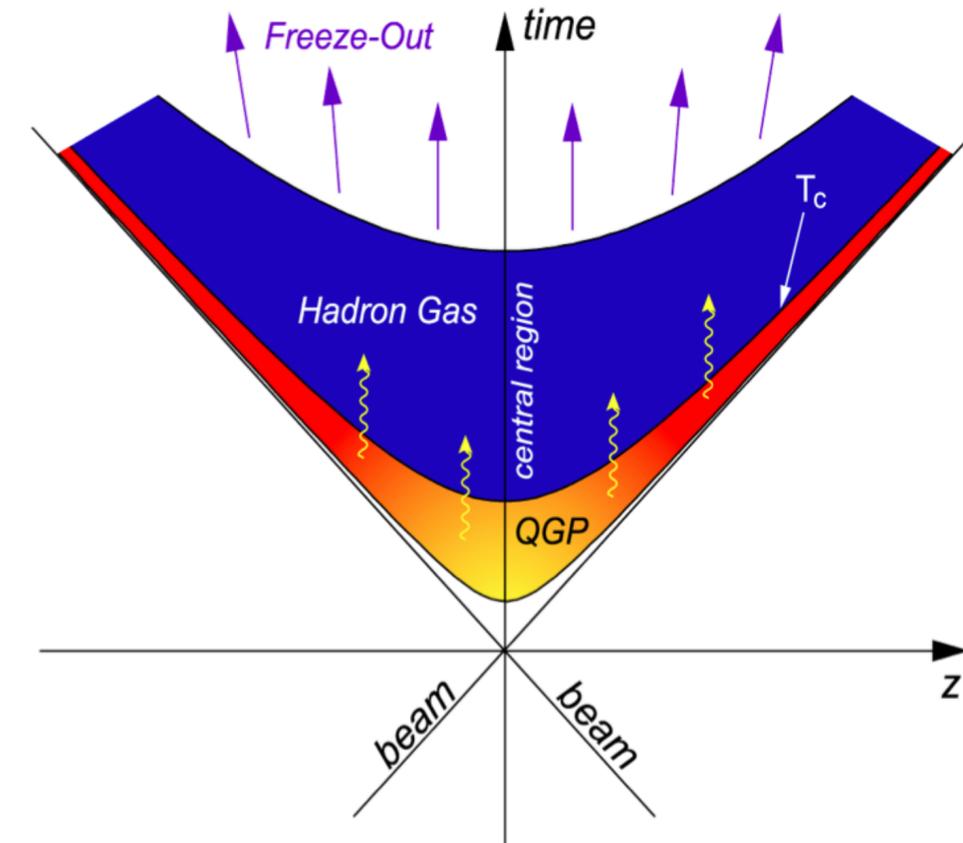
y = rapidité : équivalent de la vitesse longitudinale en régime non relativiste

τ_0 : temps de formation du QGP

Modélisation simpliste qui dépend de τ_0

Comparaison des accélérateurs

	SPS	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV) (max)	19	200	5500 (design)
$dN_{ch}/d\eta _{\eta=0}$	400	600	1600 (à 2.76 TeV)
V_f (fm ³)	1500	2000	5000 (à 2.76 TeV)
τ_f (fm/c) : collision → freeze-out	6	7	10 (à 2.76 TeV)
ε (GeV/fm ³) $_{\tau_0=1\text{fm}/c}$	2.5	5	15
τ_0 (fm/c) : formation QGP	~1	~0.5	<0.2

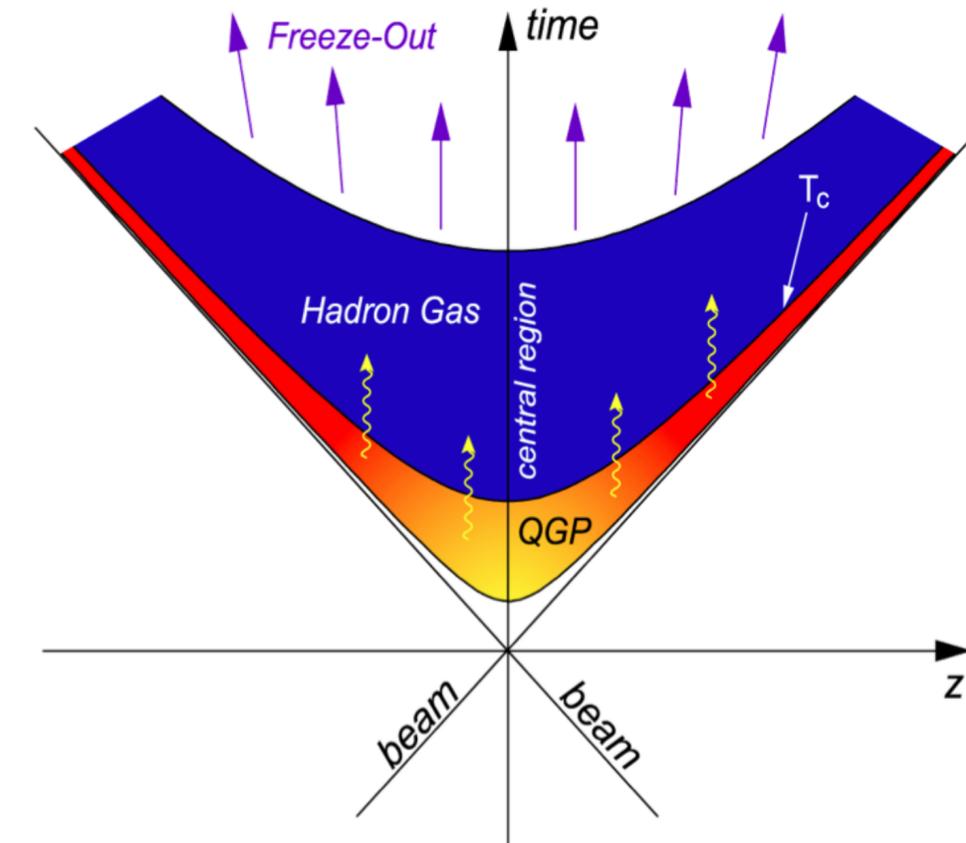


$1 \text{ fm}/c \sim 3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$

$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

Comparaison des accélérateurs

	SPS	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV) (max)	19	200	5500 (design)
$dN_{ch}/d\eta _{\eta=0}$	400	600	1600 (à 2.76 TeV)
V_f (fm ³)	1500	2000	5000 (à 2.76 TeV)
τ_f (fm/c) : collision → freeze-out	6	7	10 (à 2.76 TeV)
ε (GeV/fm ³) $_{\tau_0=1\text{fm}/c}$	2.5	5	15
τ_0 (fm/c) : formation QGP	~1	~0.5	<0.2



Conditions extrêmes au LHC :

- densité d'énergie, volume et temps de vie plus grand au LHC
- $\varepsilon > 15 \text{ GeV/fm}^3$
 - ~50 fois le cœur d'une étoile à neutrons
 - ~30 milliards de tonnes/cm³
 - ~10 protons confinés dans le volume d'un seul !

1 fm/c ~ 3.10⁻²⁴ s
1 fm = 10⁻¹⁵ m

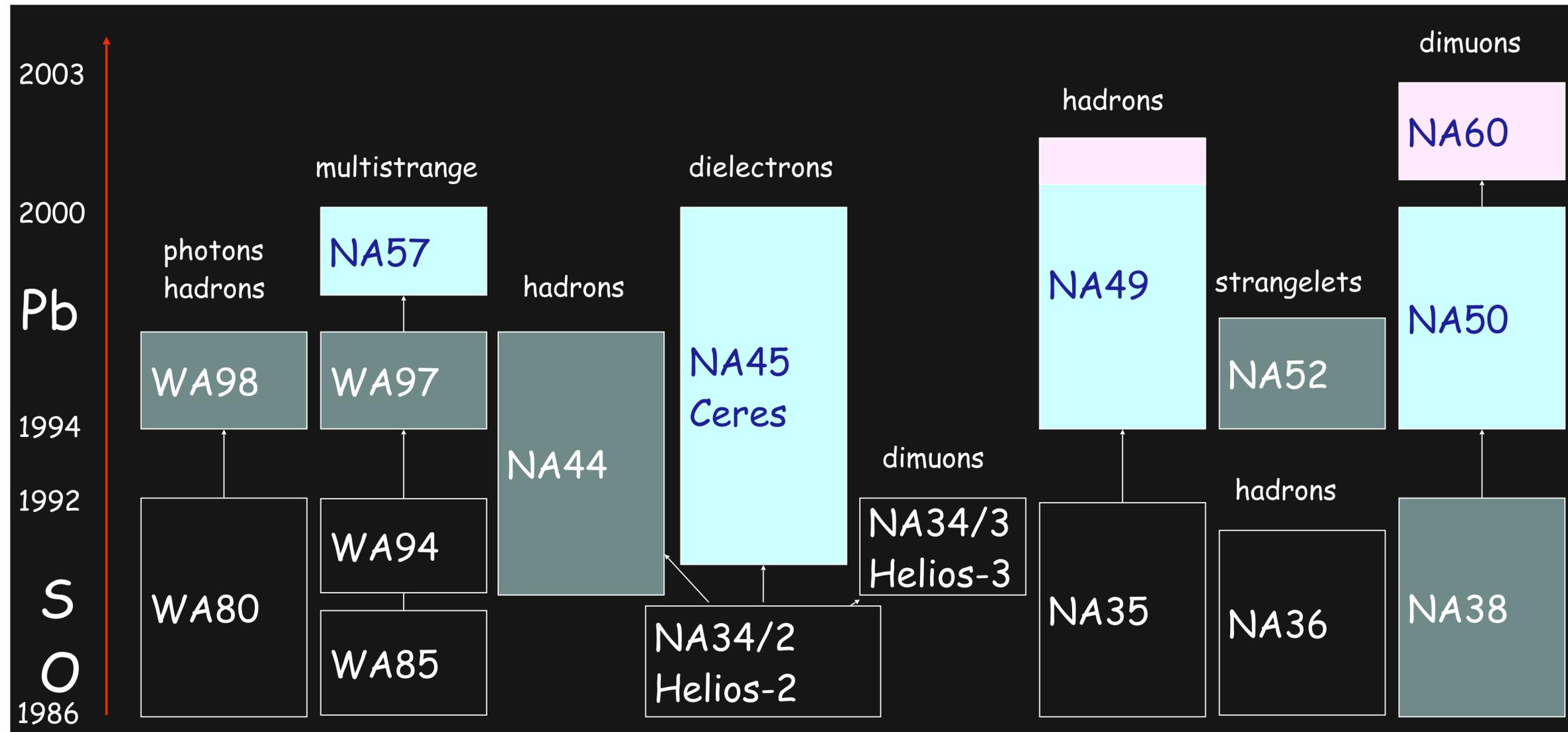
Sommaire

- I. Matière nucléaire et le plasma de quarks et de gluons (QGP)
 - 1. Notions fondamentales et interaction forte
 - 2. Les phases de la matière nucléaire et le QGP
 - 3. Sonder le QGP en laboratoire
- II. De la physique au détecteur
 - 1. Les accélérateurs d'ions lourds ultra-relativistes
 - 2. Expériences passées et présentes**
 - 3. L'expérience ALICE et le spectromètre à muons
 - 4. La vie d'un(e) physicien(ne) sur une expérience
- III. Résultats et expériences futures
 - 1. Des données aux résultats
 - 2. Des résultats (une sélection) à la théorie
 - 3. Upgrade et expériences futures

Les expériences ions lourds au SPS

- 1986 - 1987 : Oxygène @ 60 & 200 GeV/nucléon
- 1987 - 1992 : Soufre @ 200 GeV/nucléon
- 1994 - 2000 : Plomb @ 40, 80 & 158 GeV/nucléon
- 2002 - 2003 : Indium et plomb @ 158 GeV/nucléon
- Et aussi faisceau de proton pour collisions de référence p-A

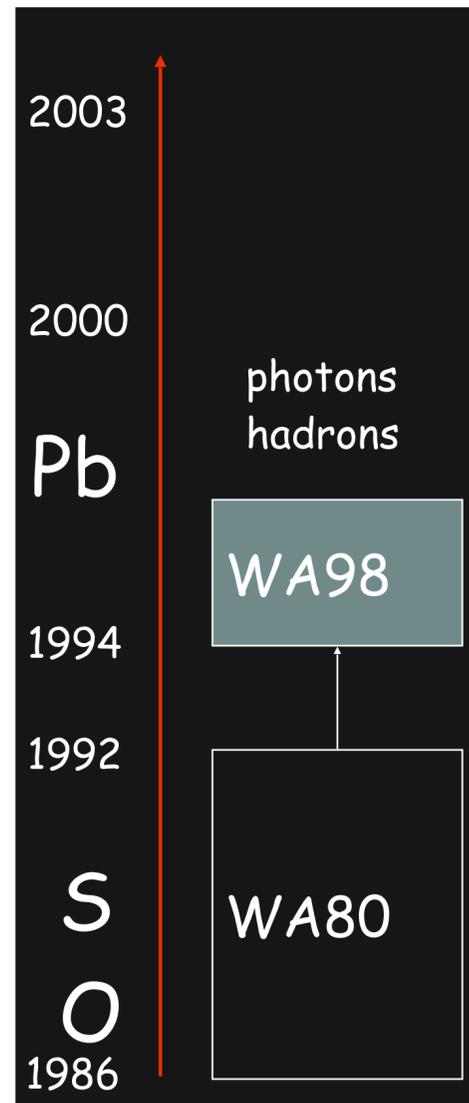
Densité d'énergie de 1 à 2.5 GeV/fm³
($\tau_0=1\text{fm}/c$)



Les expériences ions lourds au SPS

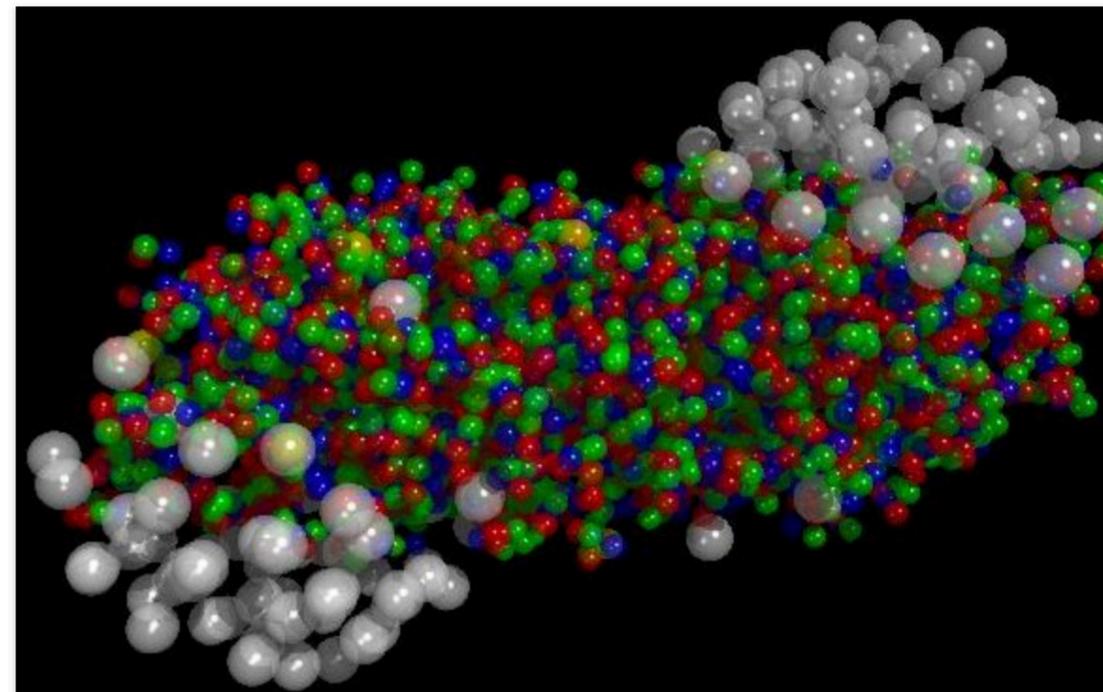
- 1986 - 1987 : Oxygène @ 60 & 200 GeV/nucléon
- 1987 - 1992 : Soufre @ 200 GeV/nucléon
- 1994 - 2000 : Plomb @ 40, 80 & 158 GeV/nucléon
- 2002 - 2003 : Indium et plomb @ 158 GeV/nucléon
- Et aussi faisceau de proton pour collisions de référence p-A

Densité d'énergie de 1 à 2.5 GeV/fm³
($\tau_0=1\text{fm}/c$)

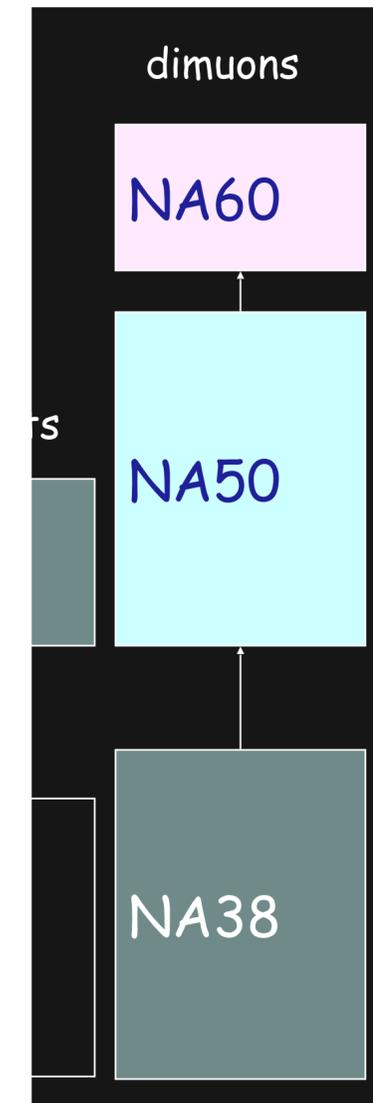


Un nouvel état de la matière créé au CERN

10 FÉVRIER, 2000



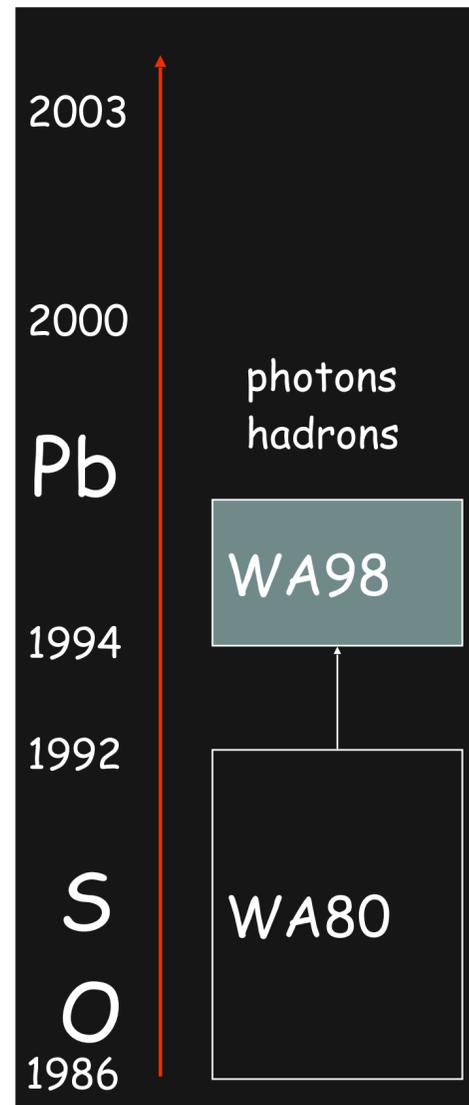
Genève, le 10 février 2000. Lors d'un séminaire spécial qui s'est tenu le 10 février, les porte-parole des expériences constituant le programme des ions lourds du CERN¹ ont présenté des preuves décisives de l'existence d'un nouvel état de la matière dans lequel les quarks, au lieu d'être confinés dans des particules plus complexes, comme les protons et les neutrons, sont déliés et se déplacent librement.



Les expériences ions lourds au SPS

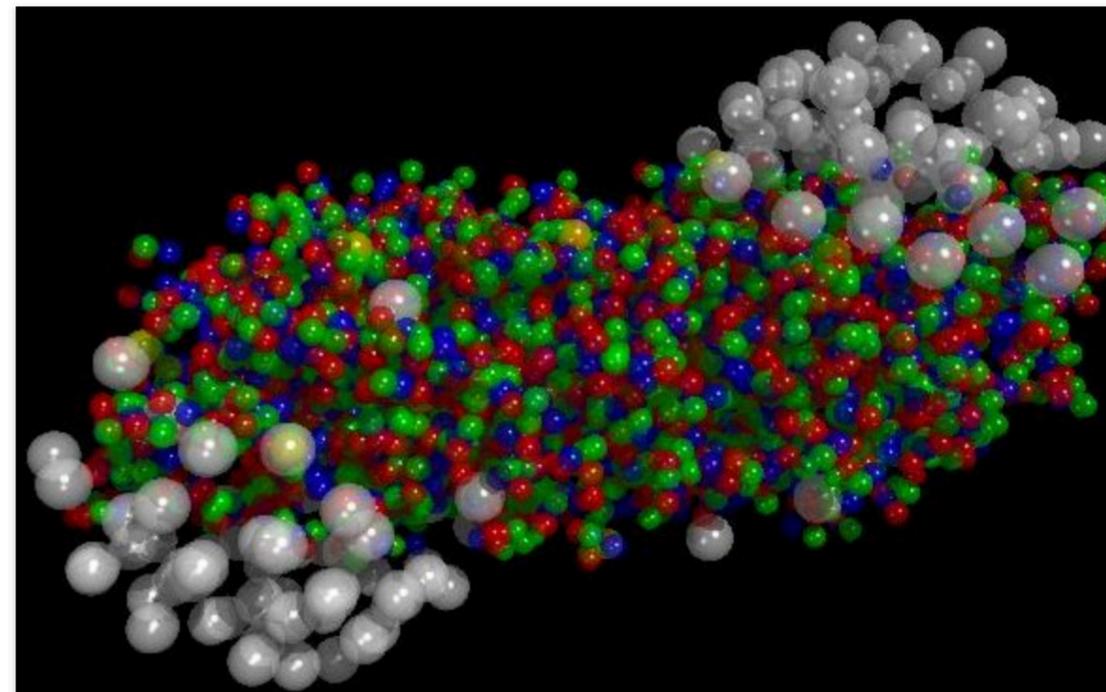
- 1986 - 1987 : Oxygène @ 60 & 200 GeV/nucléon
- 1987 - 1992 : Soufre @ 200 GeV/nucléon
- 1994 - 2000 : Plomb @ 40, 80 & 158 GeV/nucléon
- 2002 - 2003 : Indium et plomb @ 158 GeV/nucléon
- Et aussi faisceau de proton pour collisions de référence p-A

Densité d'énergie de 1 à 2.5 GeV/fm³
($\tau_0=1\text{fm}/c$)

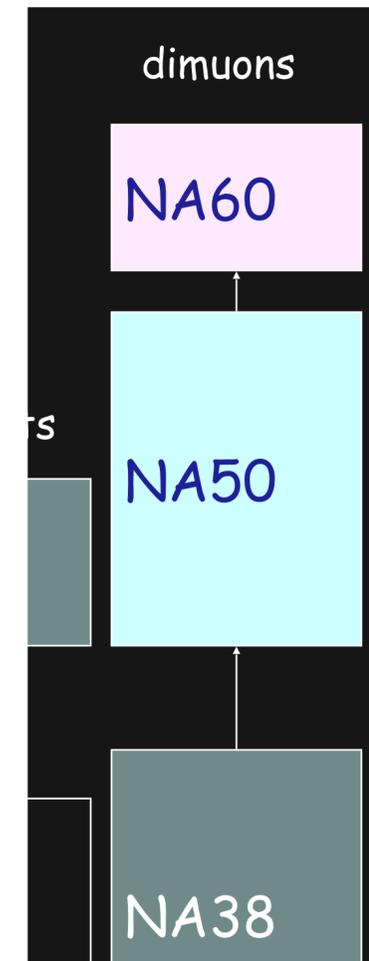


Un nouvel état de la matière créé au CERN

10 FÉVRIER, 2000



Genève, le 10 février 2000. Lors d'un séminaire spécial qui s'est tenu le 10 février, les porte-paroles des expériences constituant le programme des ions lourds du CERN¹ ont présenté des preuves de l'existence d'un nouvel état de la matière dans lequel les quarks, au lieu d'être confinés dans des nucléons complexes, comme les protons et les neutrons, sont déliés et se déplacent librement.



2008-ongoing: NA61/SHINE
120 collaborateurs

Les collisions d'ions lourds au RHIC

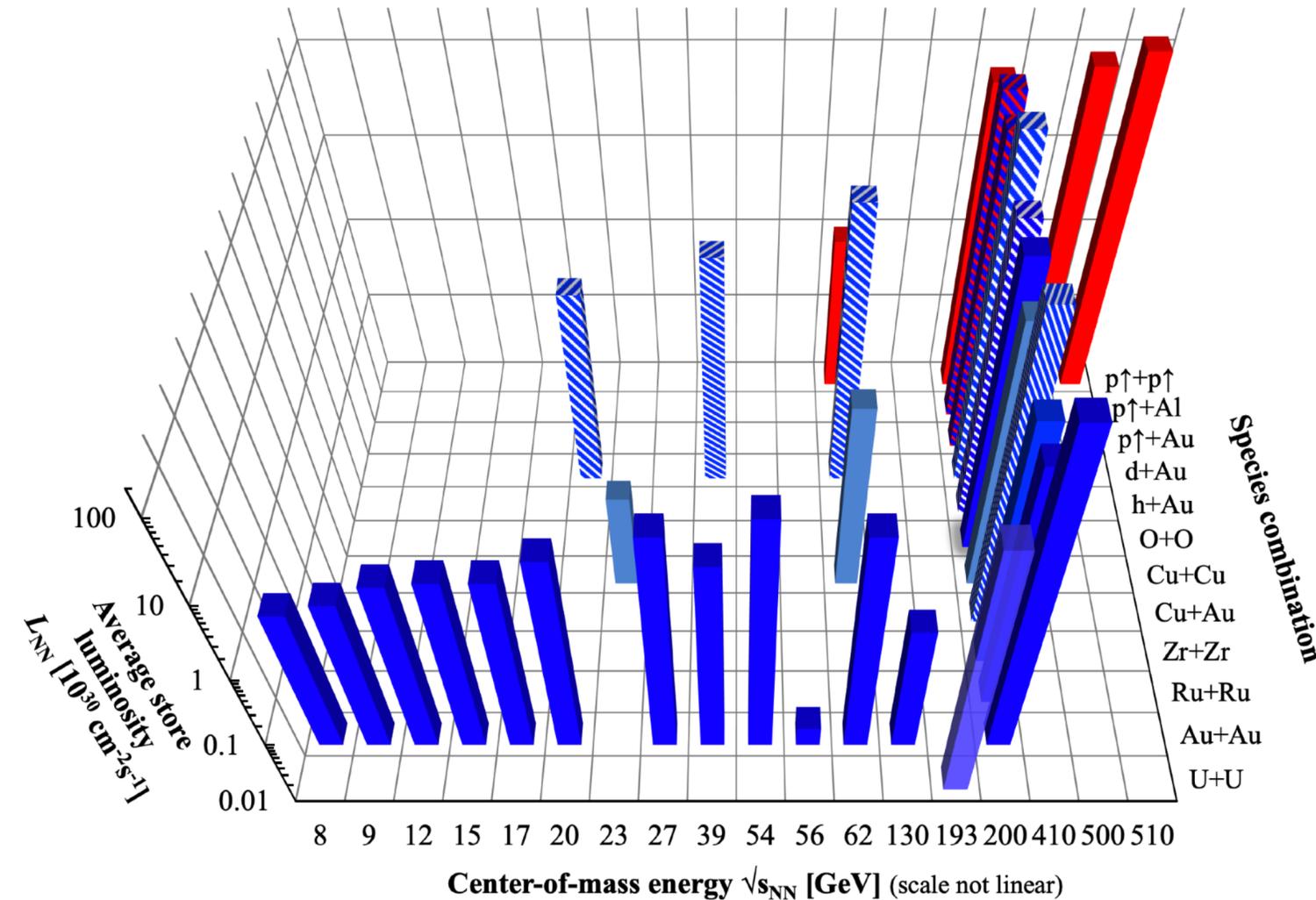
Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
01	2000	Au+Au	130
02	2001-2002	Au-Au p+p	19 / 200 200
03	2002-2003	d+Au p+p	200 200
04	2003-2004	Au+Au	62.4 / 200
05	2005	Cu+Cu p+p	22.4 / 62.4 / 200 200
06	2006	p+p	62.4 / 200
07	2007	Au+Au	200
08	2007-2008	d+Au p+p	200 200
09	2008-2009	p+p	200 / 500
10	2009-2010	Au+Au	200 / 62 / 39 / 11.5 / 7.7
11	2011	Au+Au p+p	200 / 27 / 20 500
12	2012	Cu+Au U+U p+p	200 193 500 / 200
13	2013	p+p	500
14	2014	Au+Au h+Au	200/15 ~ 200
15	2015	p+p (polarisé) p+Au, p+Al (polarisé)	~200 200
16	2016	Au+Au d+Au	200 ~200, 62, 20, 40
17	2017	p+p (polarisé) Au+Au	500 54

Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
18	2018	Zr+Zr Ru+Ru Au+Au Au+Au fixed target	200 200 27 2.98 / 7.15
19	2019	Au-Au Au-Au fixed target	7.3 / 9.18 / 9.8/19.6/200 3 / 3.22 / 3.93 / 7.77
20	2020	Au-Au Au-Au fixed target	9.18 / 11.5 3.54 / 3.93 / 4.49 / 6.19 / 7.18 / 7.77
21	2021	Au+Au Au+Au fixed target O+O d+Au	7.7 / 17.4 / 200 3.85 / 7.15 / 11.54 / 44.5 200 200

Les collisions d'ions lourds au RHIC

Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
01	2000	Au+Au	100

RHIC energies, species combinations and luminosities (Run-1 to 22)



15	2015	p+p (polarisé) p+Au, p+Al (polarisé)	~200 200
16	2016	Au+Au d+Au	200 ~200, 62, 20, 40
17	2017	p+p (polarisé) Au+Au	500 54

Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
-----	-------	---------	-----------------------

18	2018	Zr+Zr Ru+Ru Au+Au Au+Au fixed target	200 200 27 2.98 / 7.15
----	------	---	---------------------------------

19	2019	Au-Au Au-Au fixed target	7.3 / 9.18 / 9.8 / 19.6 / 200 3 / 3.22 / 3.93 / 7.77
----	------	-----------------------------	---

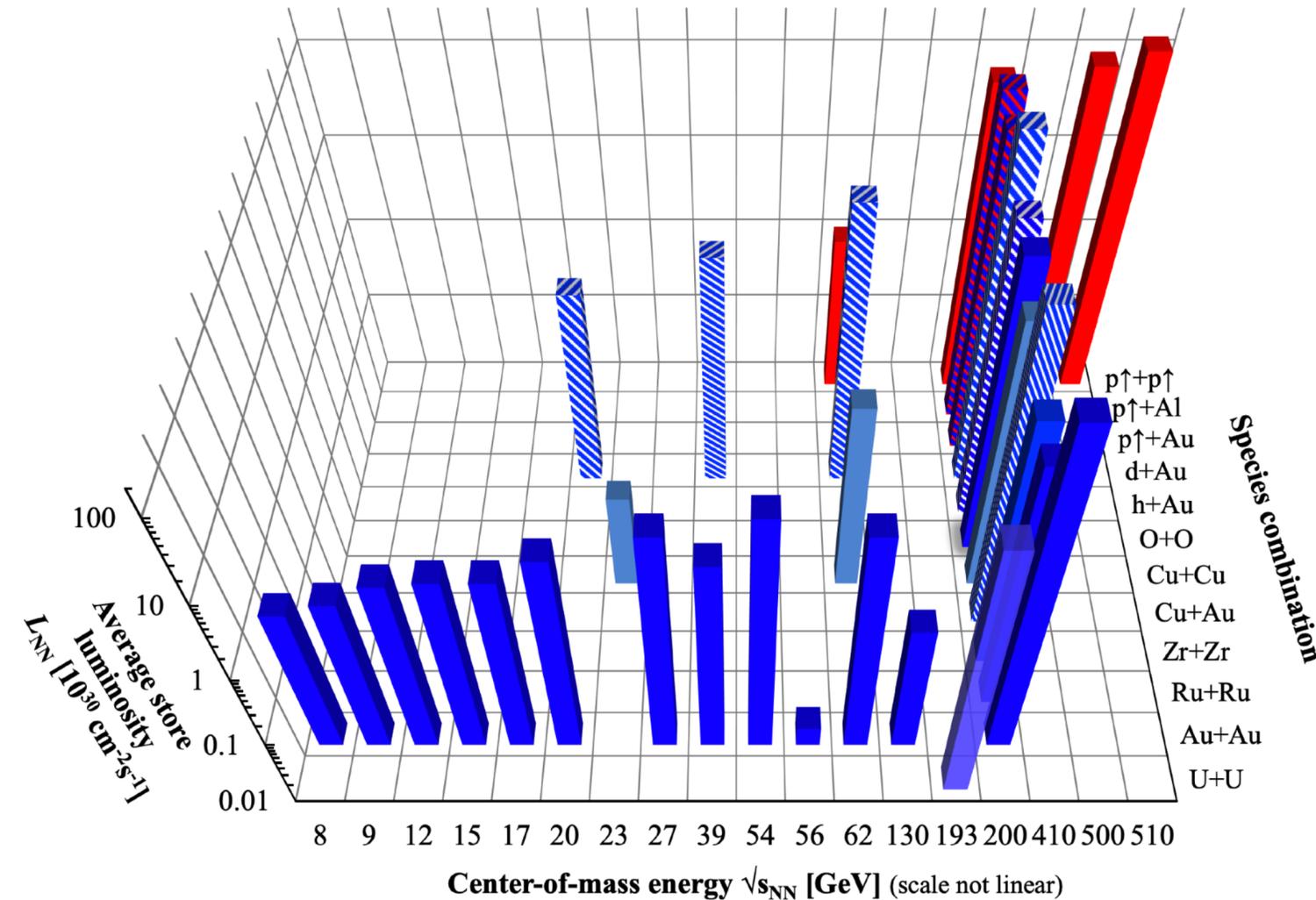
20	2020	Au-Au Au-Au fixed target	9.18 / 11.5 3.54 / 3.93 / 4.49 / 6.19 / 7.18 / 7.77
----	------	-----------------------------	--

21	2021	Au+Au Au+Au fixed target O+O d+Au	7.7 / 17.4 / 200 3.85 / 7.15 / 11.54 / 44.5 200 200
----	------	--	--

Les collisions d'ions lourds au RHIC

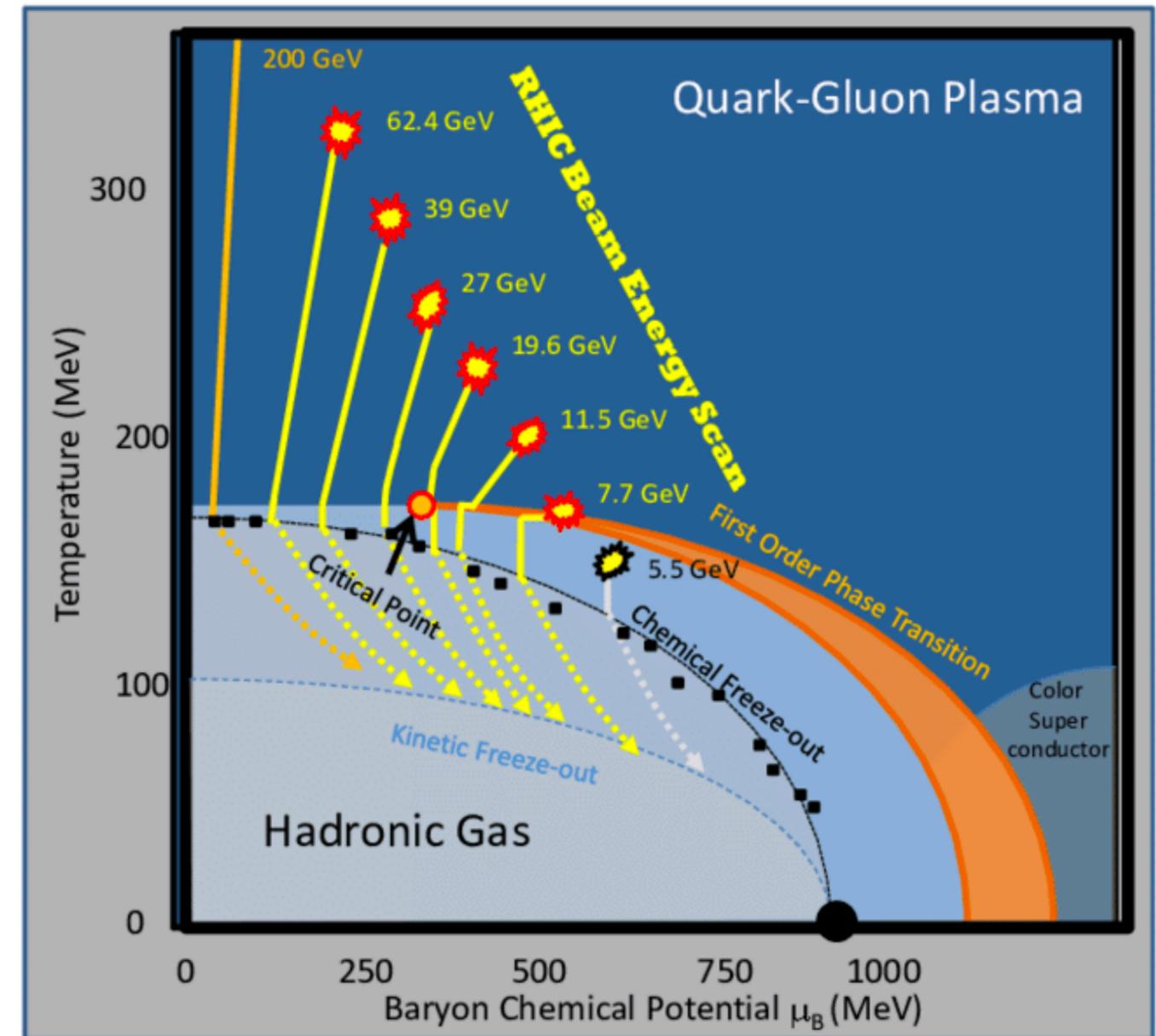
Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
01	2000	Au+Au	100

RHIC energies, species combinations and luminosities (Run-1 to 22)



15	2015	p+p (polarisé) p+Au, p+Al (polarisé)	~200 200
16	2016	Au+Au d+Au	200 ~200, 62, 20, 40
17	2017	p+p (polarisé) Au+Au	500 54

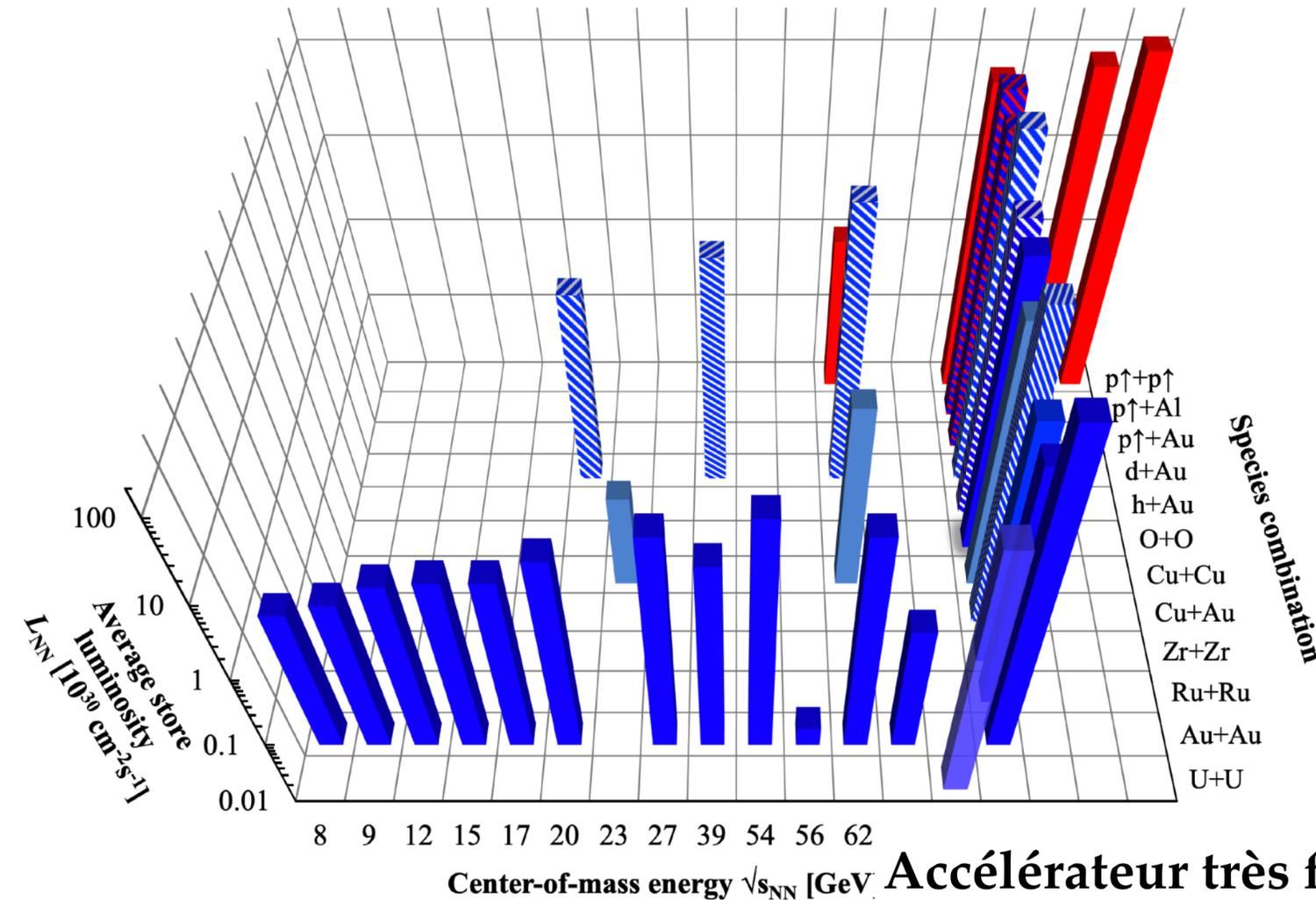
Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
18	2018	Au+Au	200
19	2019	Au+Au	200
20	2020	Au+Au	200
21	2021	Au+Au	200



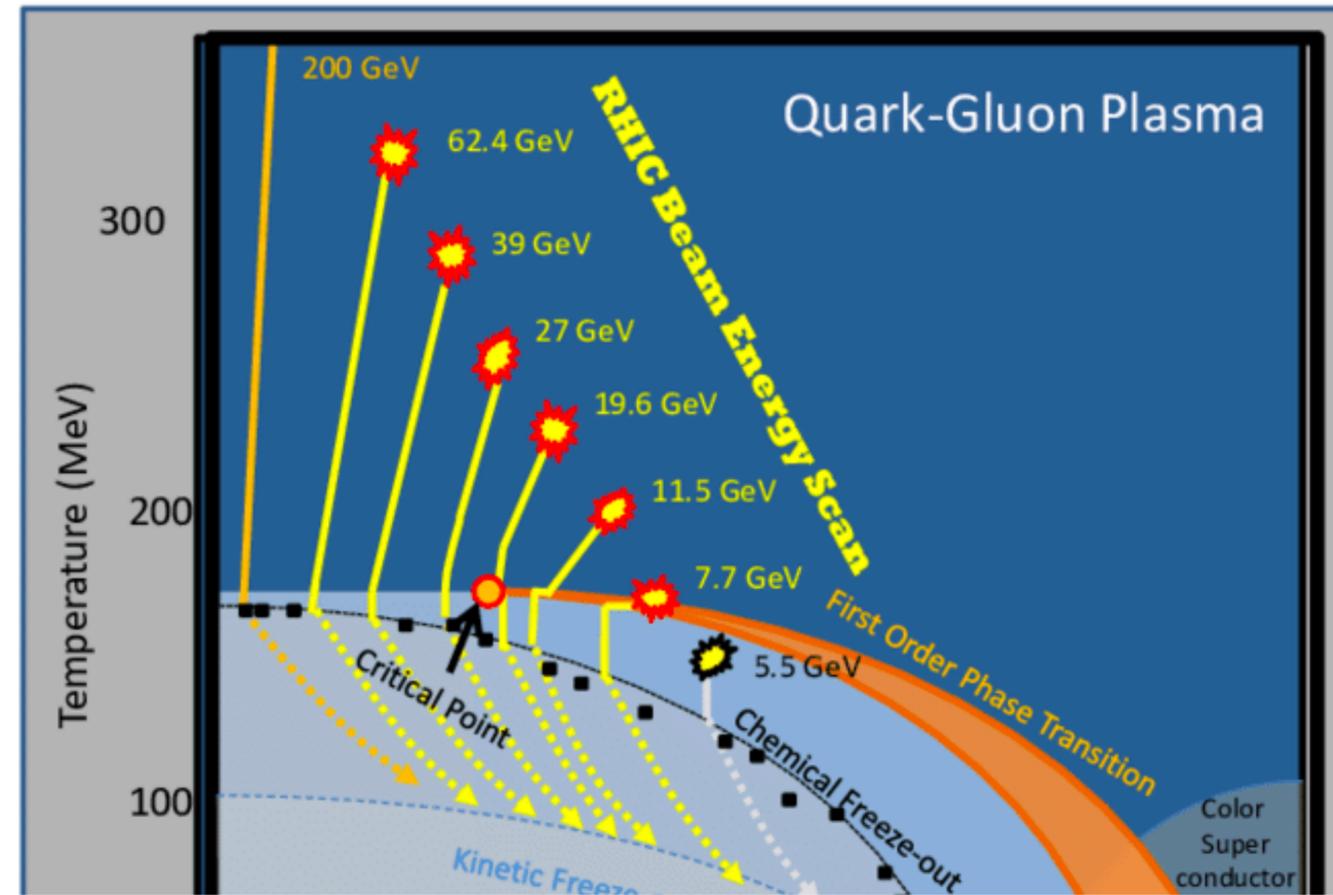
Les collisions d'ions lourds au RHIC

Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
01	2000	Au+Au	100

RHIC energies, species combinations and luminosities (Run-1 to 22)



Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
18	2001	Au+Au	200
19	2001	Au+Au	200
20	2001	Au+Au	200



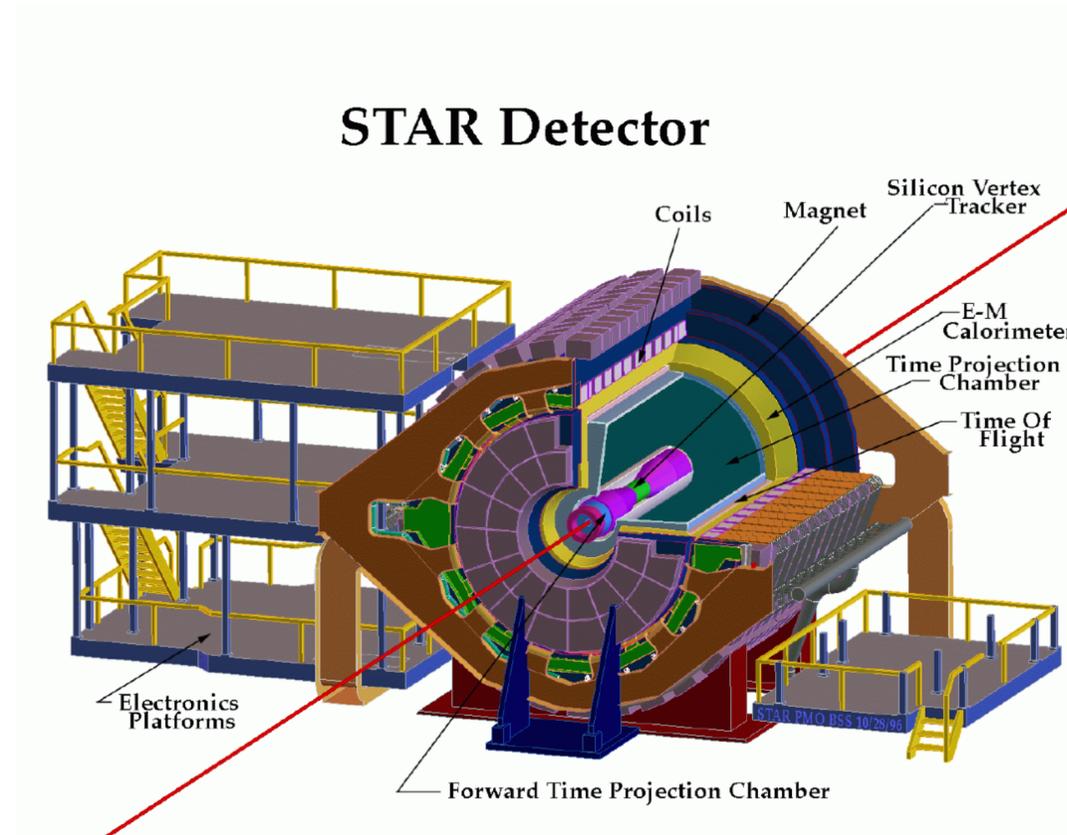
Accélérateur très flexible, dédié aux ions lourds :

15	2015	p+p (polarisé) p+Au, p+Al (polarisé)	
16	2016	Au+Au d+Au	
17	2017	p+p (polarisé) Au+Au	500 54

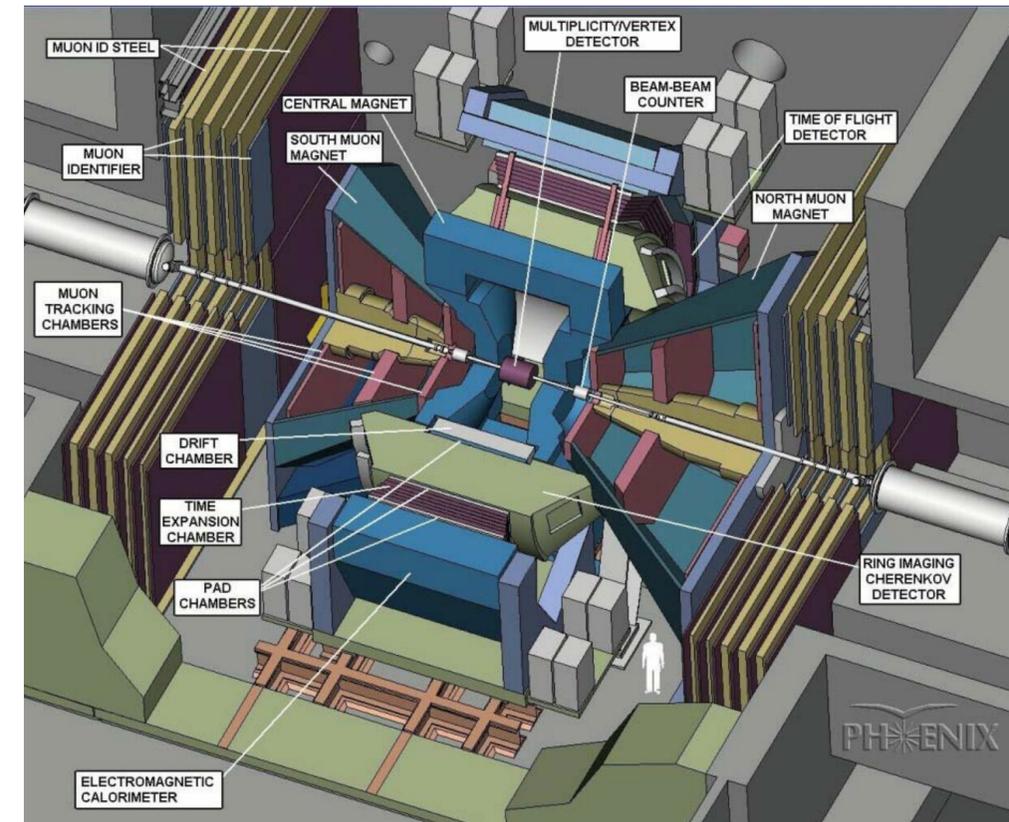
- beaucoup de types d'ions accélérés → étude QGP en fonction de la forme de l'état initial
- cibles fixes solides → scan en énergie du diagramme de phase

Les expériences de RHIC

Deux expériences généralistes sur collisionneur



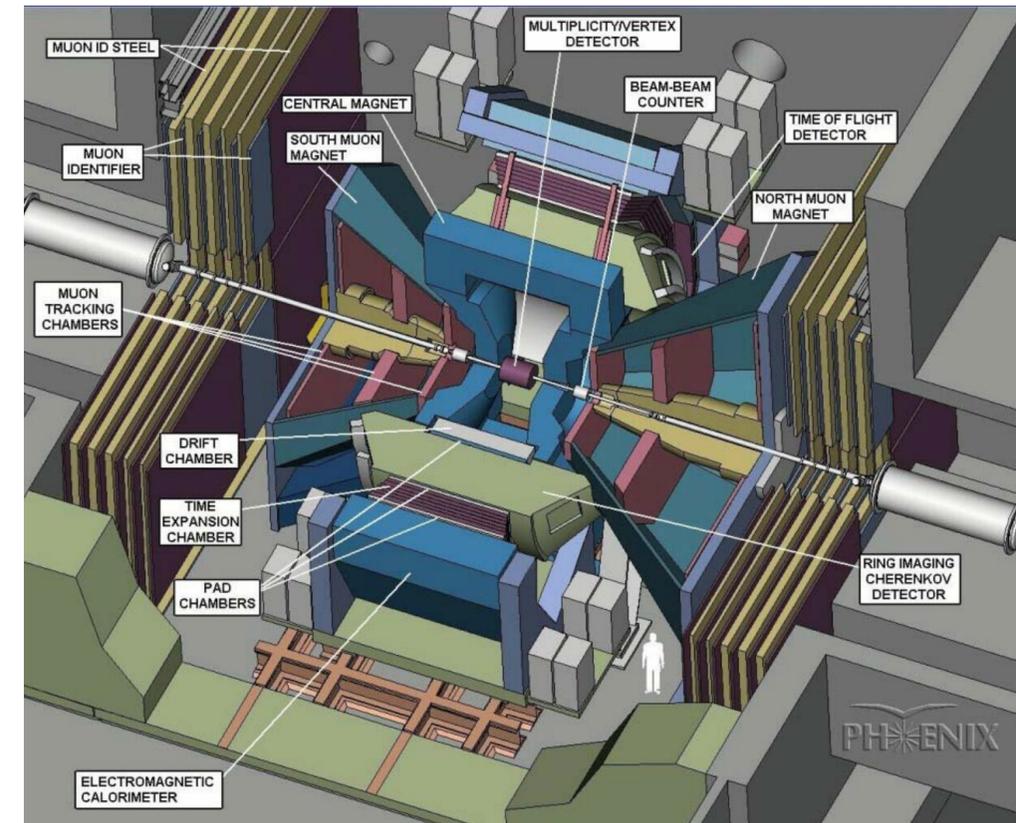
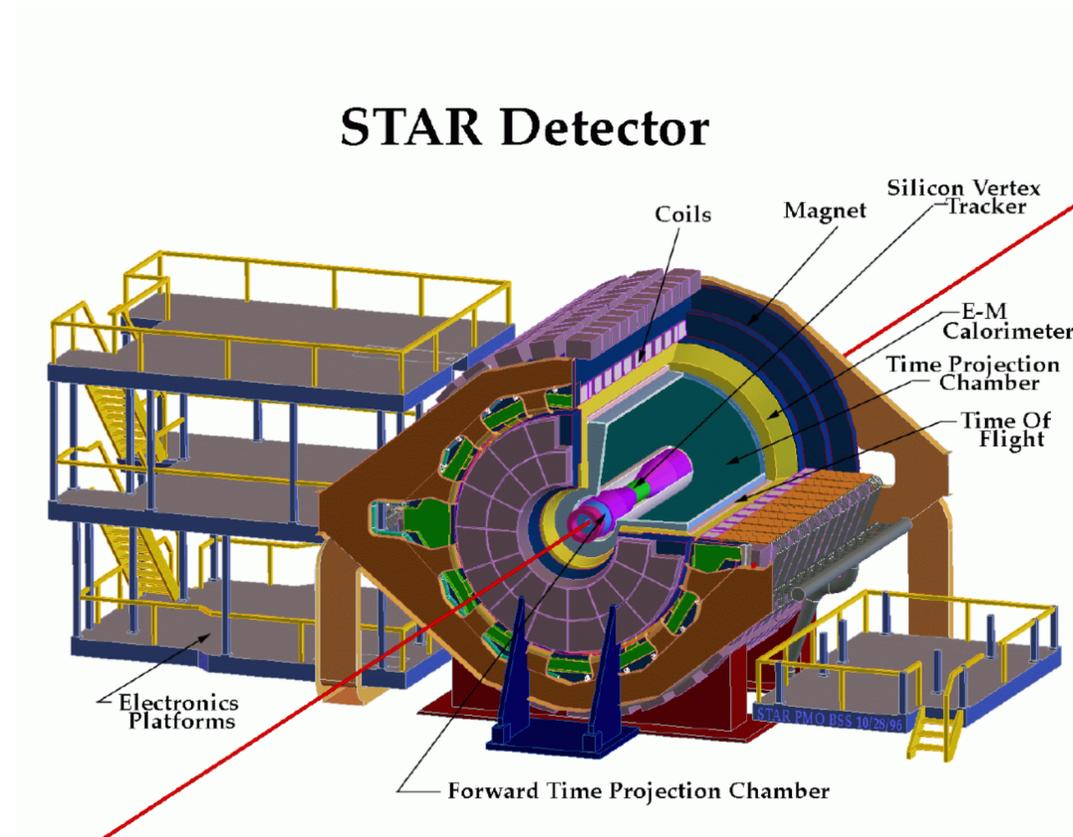
STAR
620 collaborateurs,
hadrons



PHENIX
430 collaborateurs,
leptons, photons

Les expériences de RHIC

Deux expériences généralistes sur collisionneur



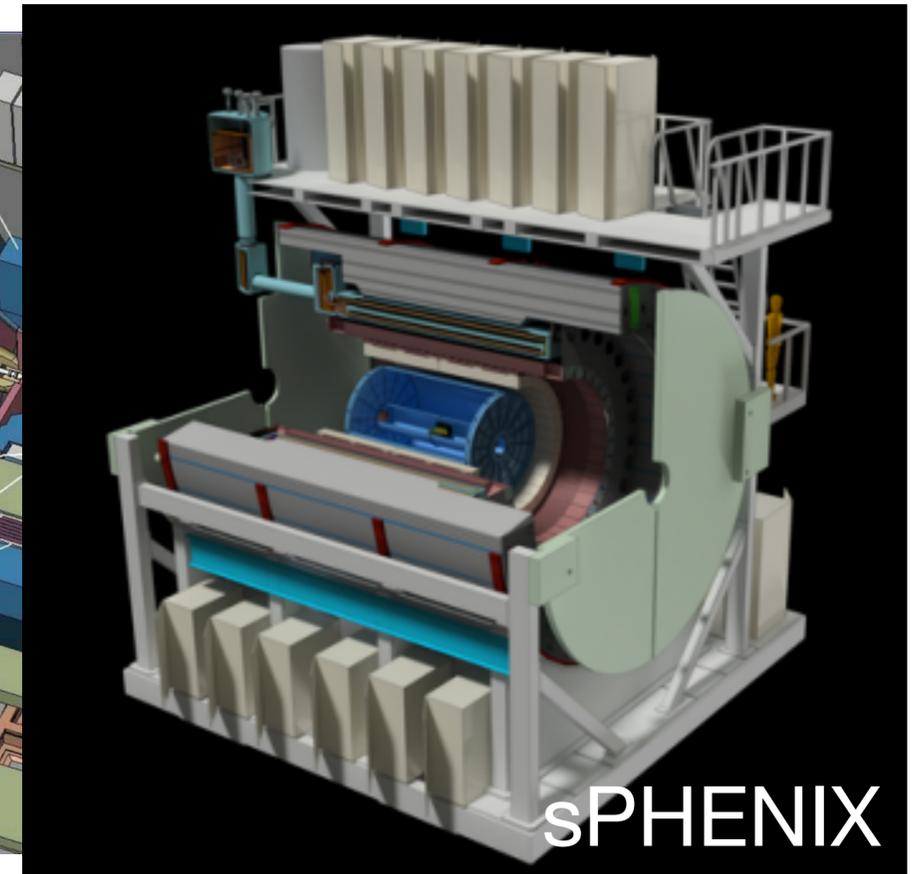
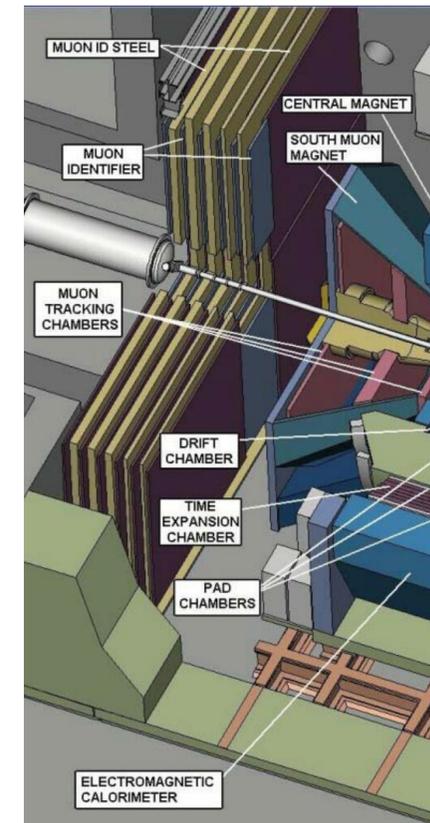
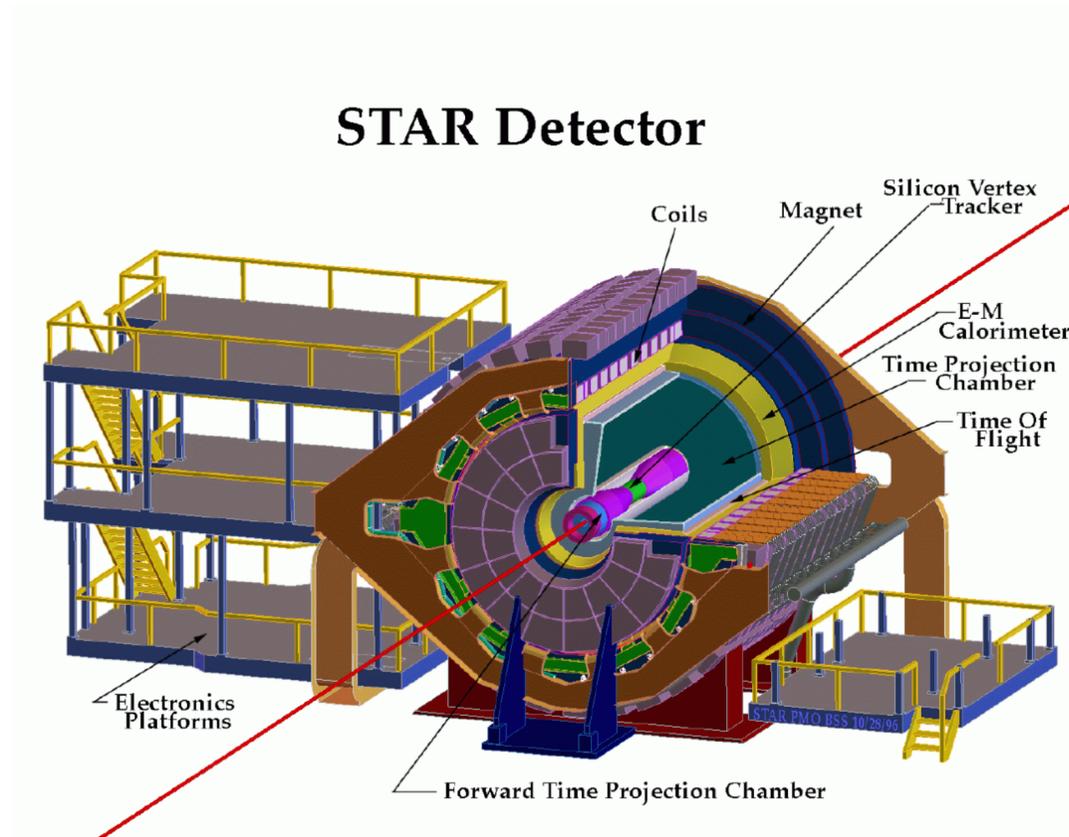
STAR
620 collaborateurs,
hadrons

PHENIX
430 collaborateurs,
leptons, photons

2003 : confirmation du QGP et bien plus au RHIC

Les expériences de RHIC

Deux expériences généralistes sur collisionneur



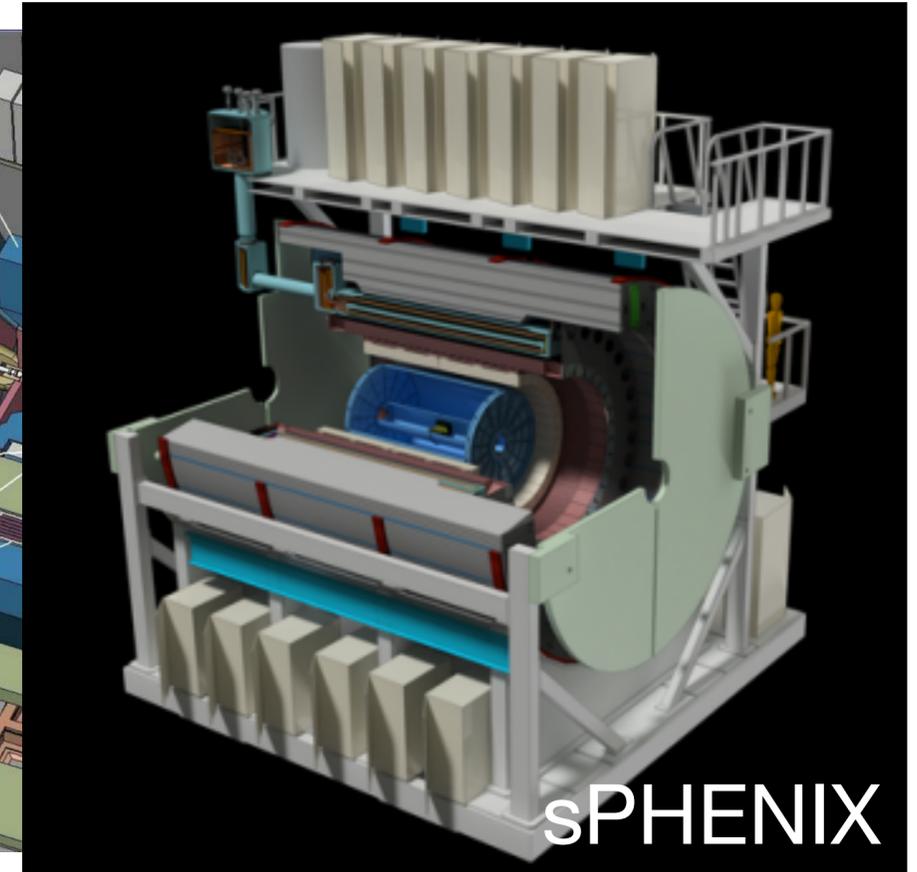
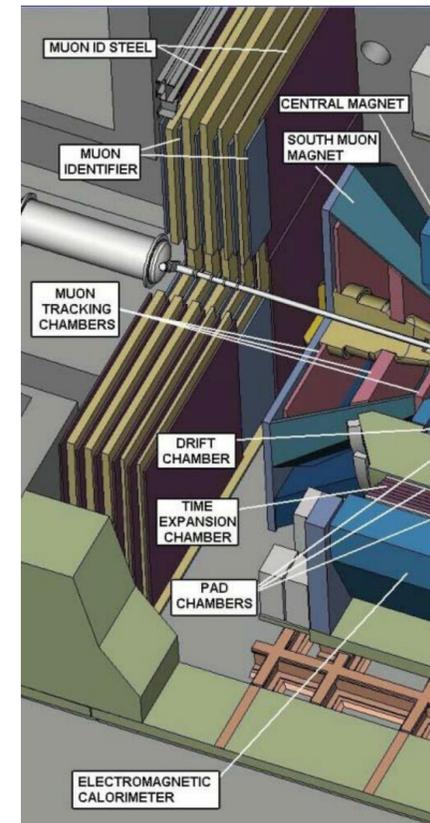
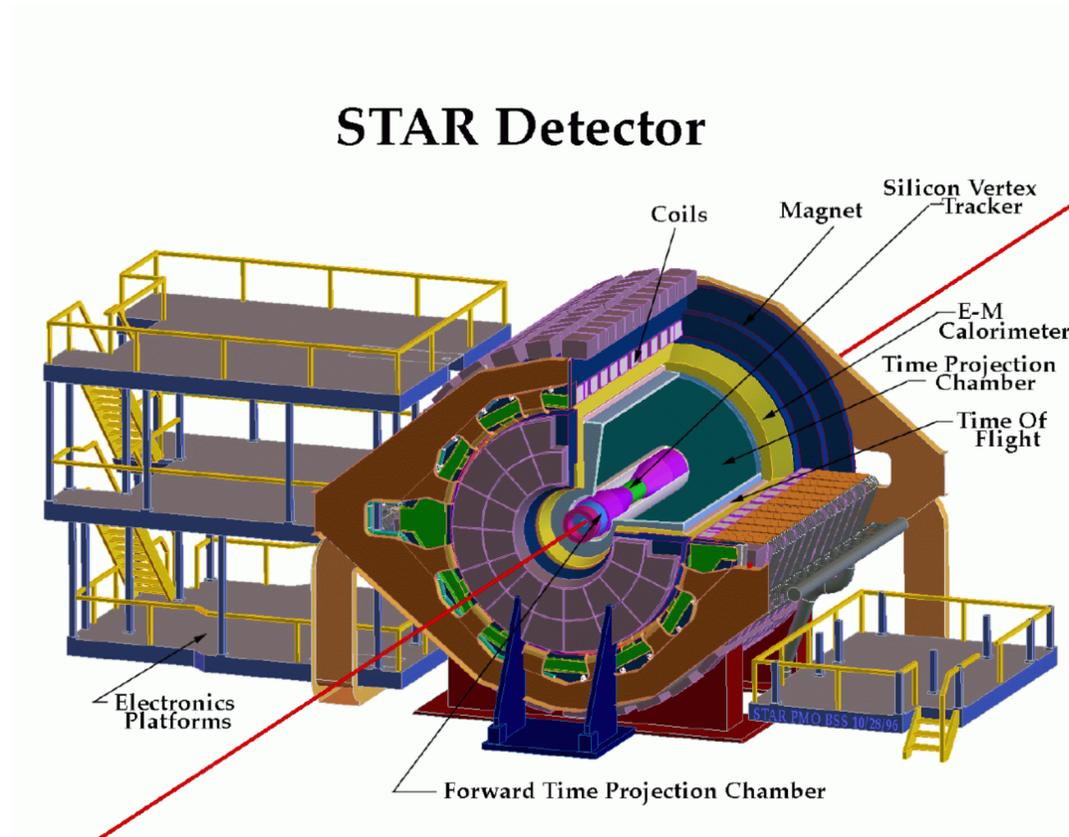
STAR
620 collaborateurs,
hadrons

PHENIX
430 collaborateurs,
leptons, photons

2003 : confirmation du QGP et bien plus au RHIC

Les expériences de RHIC

Deux expériences généralistes sur collisionneur



STAR
620 collaborateurs,
hadrons

PHENIX
430 collaborateurs,
leptons, photons

2003 : confirmation du QGP et bien plus au RHIC
Arrêt prévu : 2026 (2027...?) puis Electron Ion Collider (EIC)

Les expériences ions lourds du LHC

Le LHC n'est pas dédié aux ions lourds: 9 mois en collisions pp et 1 mois en collisions pA/AA

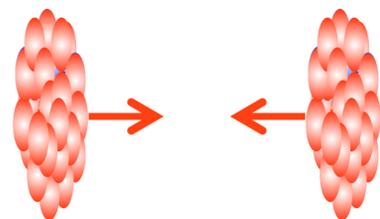
Quelques chiffres :

- Démarrage du LHC fin 2009 avec des collisions pp
- Premiers faisceaux d'ions lourds Pb-Pb fin 2010 à $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV
- Augmentation de l'énergie :
 - collisions pp jusque $\sqrt{s} = 13.6$ TeV
 - collisions Pb-Pb jusque $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$ TeV

Collisions 2009-2024 :

Pb-Pb (Xe-Xe)

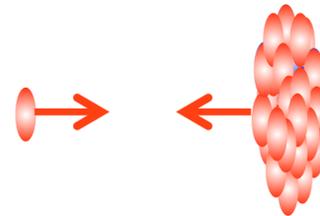
$\sqrt{s_{NN}} = 2.76, 5.02, 5.36$ (5.44) TeV



QGP

p-Pb

$\sqrt{s_{NN}} = 5.02, 8.16$ TeV



p-Pb et pp : systèmes de référence... test de la théorie QCD et bien plus !

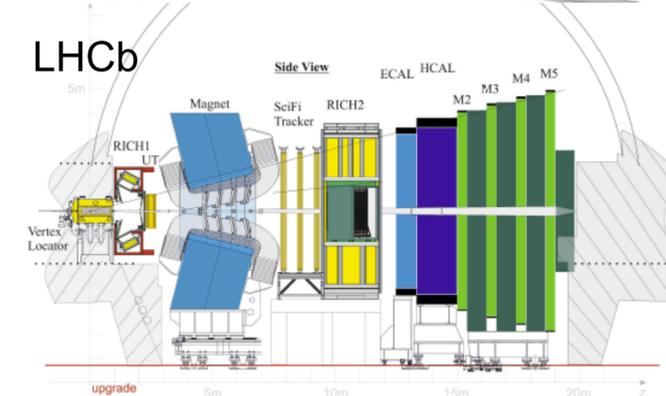
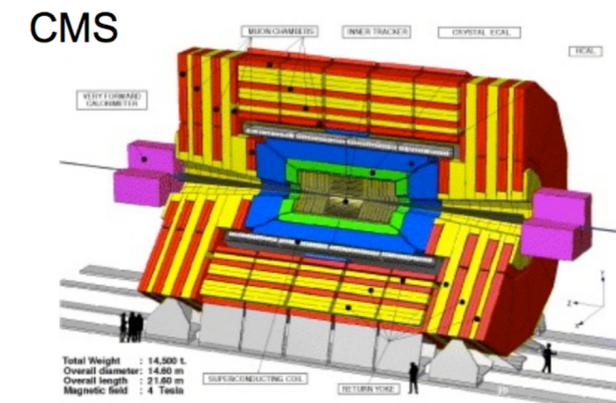
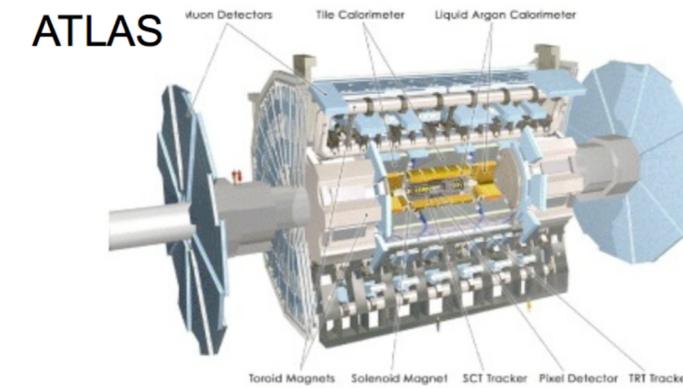
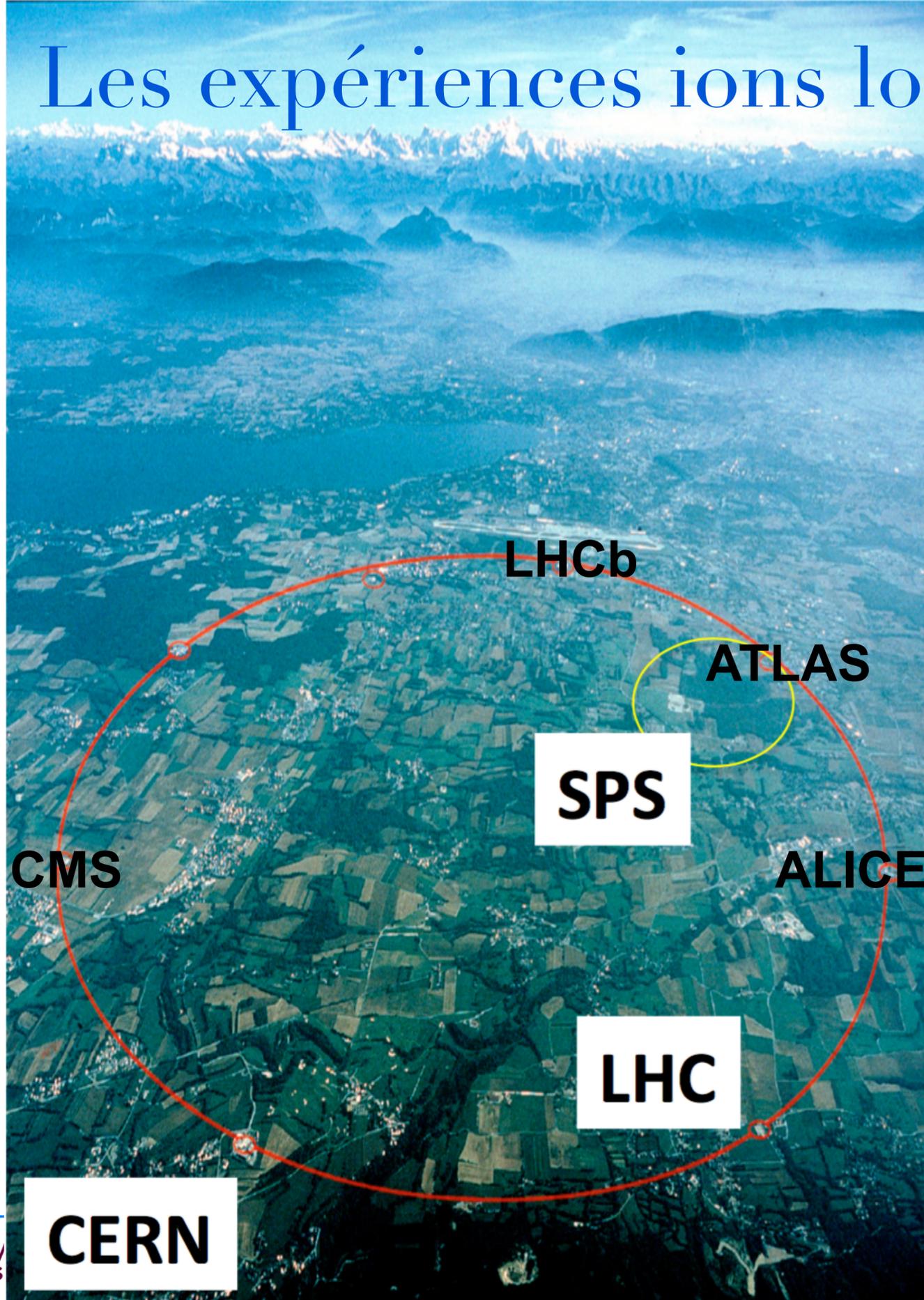
pp

$\sqrt{s} = 0.9, 2.76^*, 5.02^*, 7, 8^*, 13, 13.6$ TeV

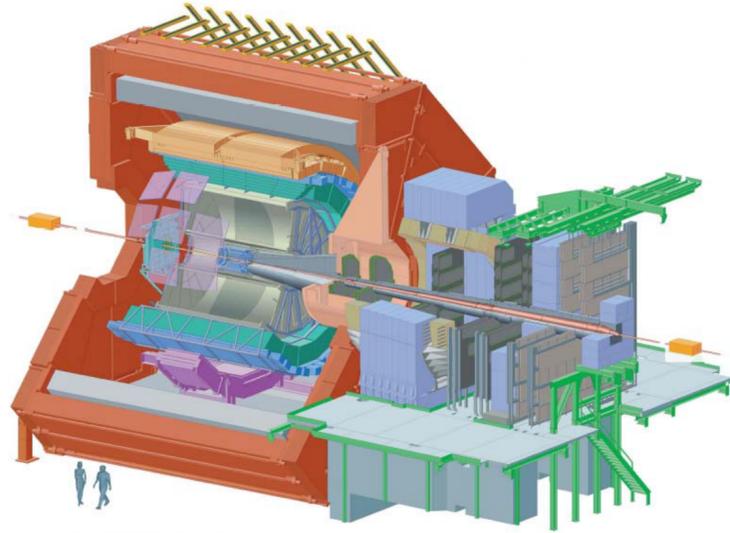


*énergies de référence

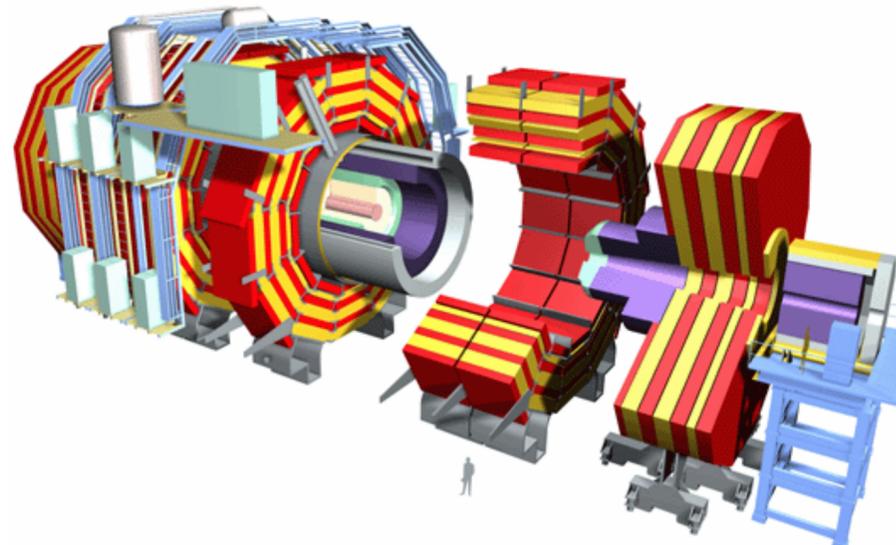
Les expériences ions lourds du LHC



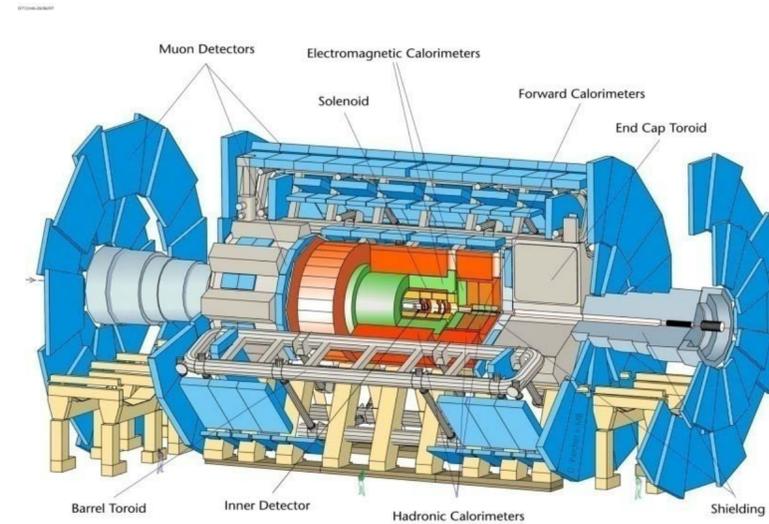
Les expériences ions lourds du LHC



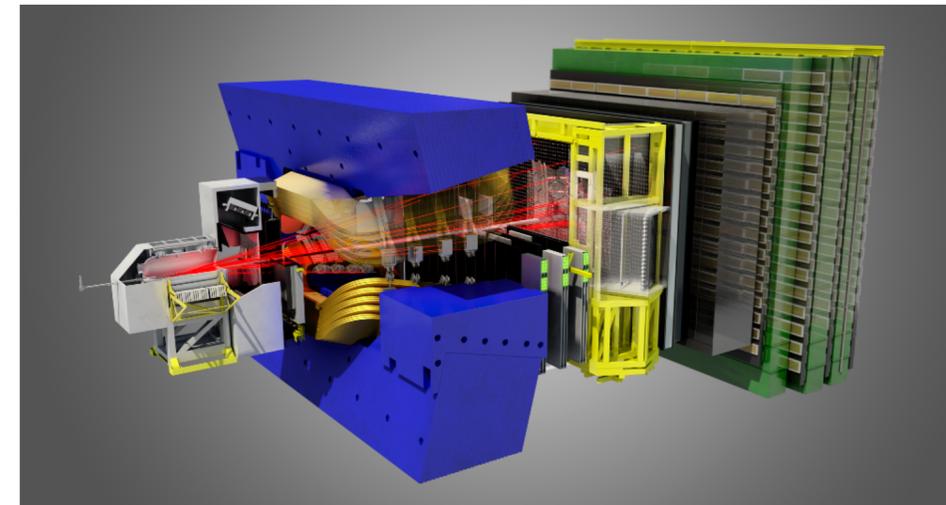
ALICE : expérience dédiée ions lourds,
2000 membres, 1000 signataires, 40 pays



CMS : solide programme ions lourds,
4000 membres, 3000 signataires, 57 pays



ATLAS : lettre d'intention ions lourds (2004),
6000 membres, 3000 signataires, 42 pays

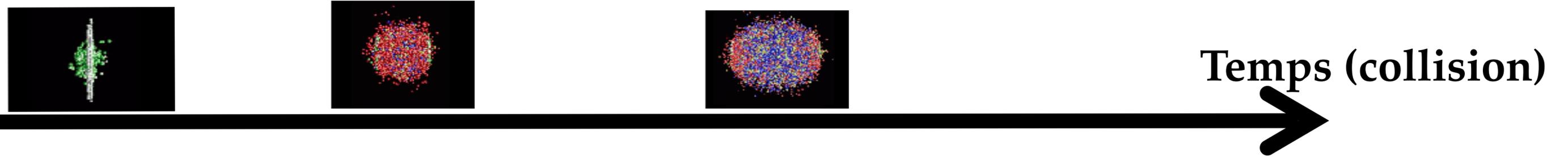


LHCb : programme ions lourds depuis 2013,
1400 membres, 1100 signataires, 17 pays

Sommaire

- I. Matière nucléaire et le plasma de quarks et de gluons (QGP)
 - 1. Notions fondamentales et interaction forte
 - 2. Les phases de la matière nucléaire et le QGP
 - 3. Sonder le QGP en laboratoire
- II. De la physique au détecteur
 - 1. Les accélérateurs d'ions lourds ultra-relativistes
 - 2. Expériences passées et présentes
 - 3. **L'expérience ALICE et le spectromètre à muons**
 - 4. La vie d'un(e) physicien(ne) sur une expérience
- III. Résultats et expériences futures
 - 1. Des données aux résultats
 - 2. Des résultats (une sélection) à la théorie
 - 3. Upgrade et expériences futures

ALICE : programme de physique

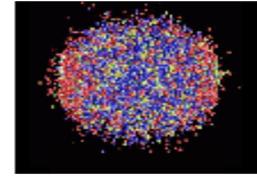
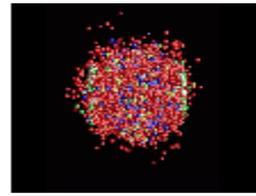
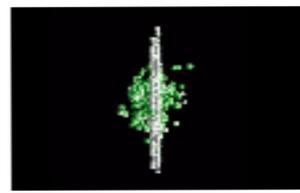


Hard scattering

- hard photons
⇒ pQCD
- heavy flavors
⇒ pQCD
- jets
⇒ pQCD

p_T (particules produites)

ALICE : programme de physique



Temps (collision)

Hard scattering

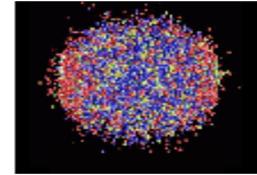
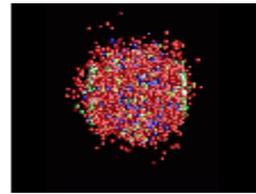
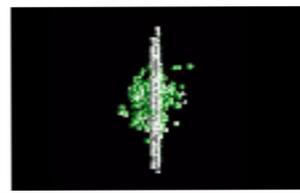
- hard photons
⇒ pQCD
- heavy flavors
⇒ pQCD
- jets
⇒ pQCD

Deconfinement

- thermal photons
⇒ QGP temperature
- heavy flavors
⇒ QGP properties
- jet quenching
⇒ QGP density

p_T (particules produites)

ALICE : programme de physique



Temps (collision)

Hard scattering

- hard photons
⇒ pQCD
- heavy flavors
⇒ pQCD
- jets
⇒ pQCD

Deconfinement

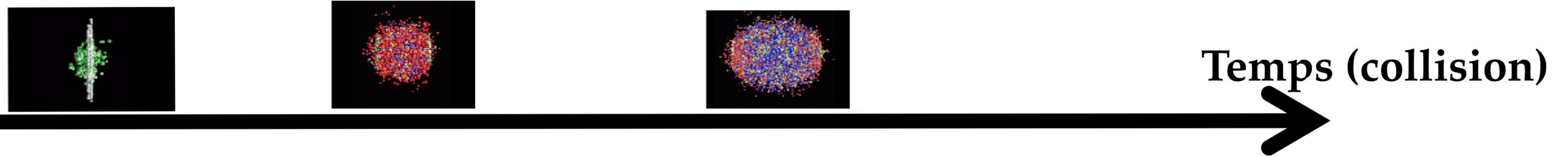
- thermal photons
⇒ QGP temperature
- heavy flavors
⇒ QGP properties
- jet quenching
⇒ QGP density

Hadronization

- EbyE fluctuations
⇒ Critical behavior
- e.l.m.dilepton,
DCC
⇒ Chiral symmetry
- exotica
⇒ QGP condens.

p_T (particules produites)

ALICE : programme de physique



Hard scattering

- hard photons
⇒ pQCD
- heavy flavors
⇒ pQCD
- jets
⇒ pQCD

Deconfinement

- thermal photons
⇒ QGP temperature
- heavy flavors
⇒ QGP properties
- jet quenching
⇒ QGP density

Hadronization

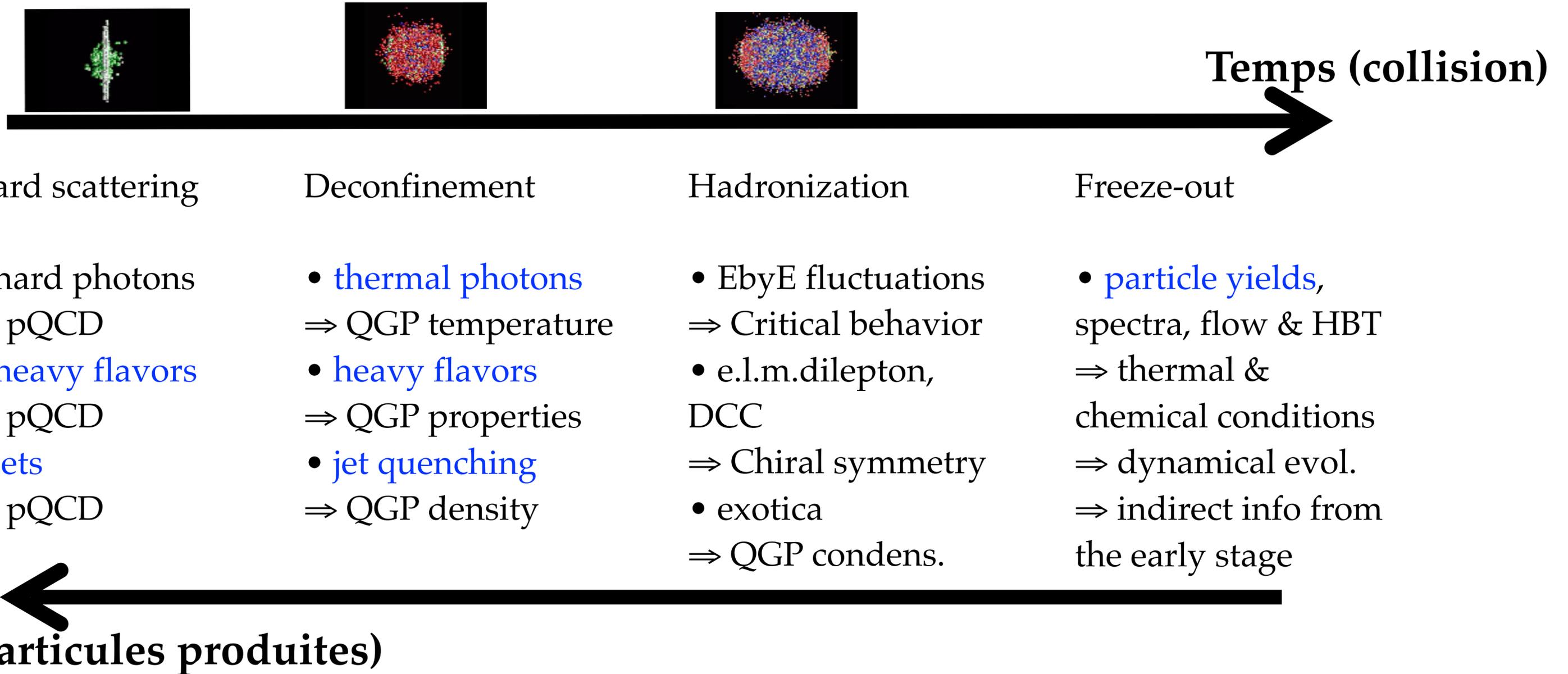
- EbyE fluctuations
⇒ Critical behavior
- e.l.m.dilepton,
DCC
⇒ Chiral symmetry
- exotica
⇒ QGP condens.

Freeze-out

- particle yields,
spectra, flow & HBT
⇒ thermal &
chemical conditions
⇒ dynamical evol.
⇒ indirect info from
the early stage

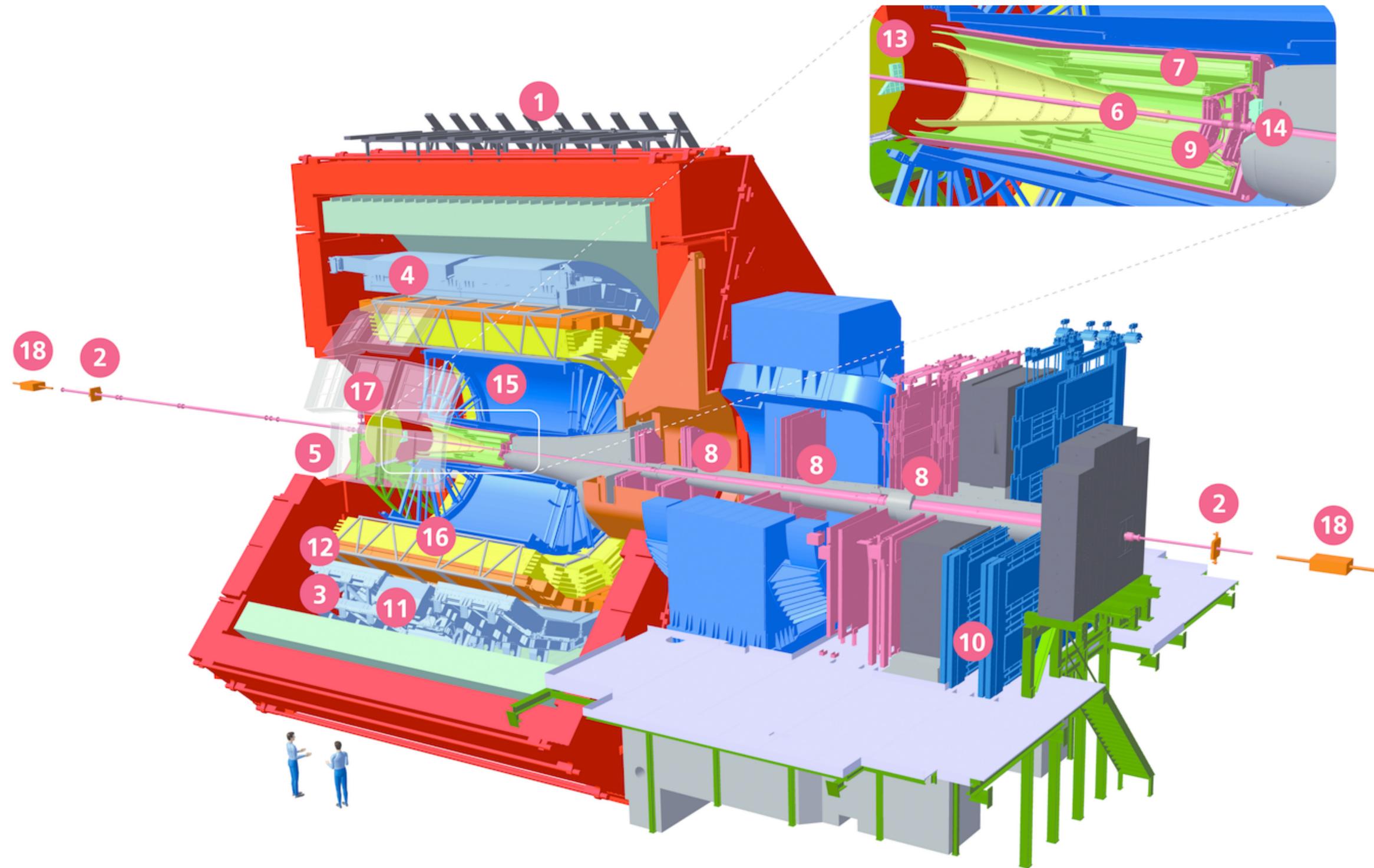
←
 p_T (particules produites)

ALICE : programme de physique



ALICE est conçu pour explorer un grand domaine en p_T ($\sim 0.1-1 < p_T < 100$ GeV) et pour corrélérer la plupart des signaux : grandes acceptances et granularité fine, triggers sélectifs, bonne efficacité de tracking, grande couverture en impulsion, reconstruction des vertex secondaires, identification des hadrons, leptons & photons.

A Large Ion Collider Experiment: ALICE



- 1 **ACORDE** | ALICE Cosmic Rays Detector
- 2 **AD** | ALICE Diffractive Detector
- 3 **DCal** | Di-jet Calorimeter
- 4 **EMCal** | Electromagnetic Calorimeter
- 5 **HMPID** | High Momentum Particle Identification Detector
- 6 **ITS-IB** | Inner Tracking System - Inner Barrel
- 7 **ITS-OB** | Inner Tracking System - Outer Barrel
- 8 **MCH** | Muon Tracking Chambers
- 9 **MFT** | Muon Forward Tracker
- 10 **MID** | Muon Identifier
- 11 **PHOS / CPV** | Photon Spectrometer
- 12 **TOF** | Time Of Flight
- 13 **T0+A** | Tzero + A
- 14 **T0+C** | Tzero + C
- 15 **TPC** | Time Projection Chamber
- 16 **TRD** | Transition Radiation Detector
- 17 **V0+** | Vzero + Detector
- 18 **ZDC** | Zero Degree Calorimeter

A Large Ion Collider Experiment: ALICE

Tonneau central: $|\eta| < 0.9, 44^\circ < \theta < 136^\circ$

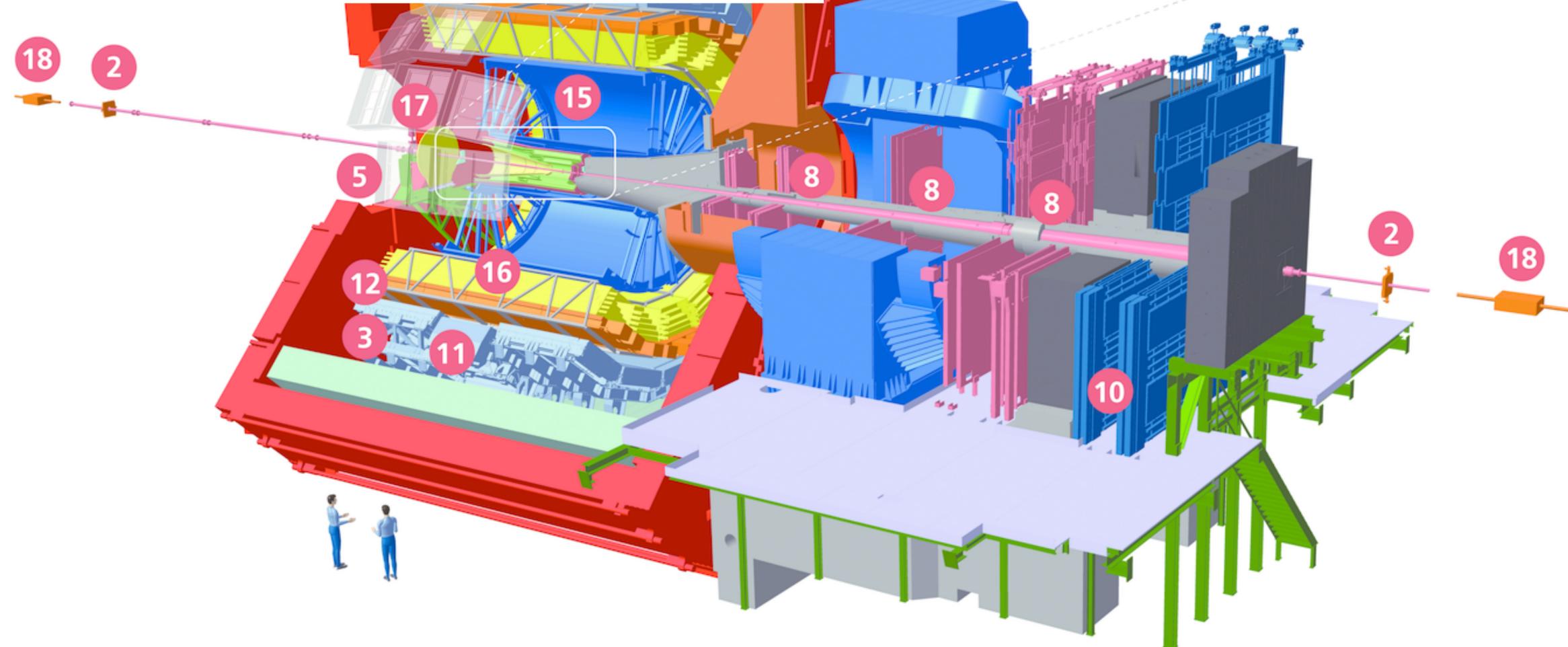
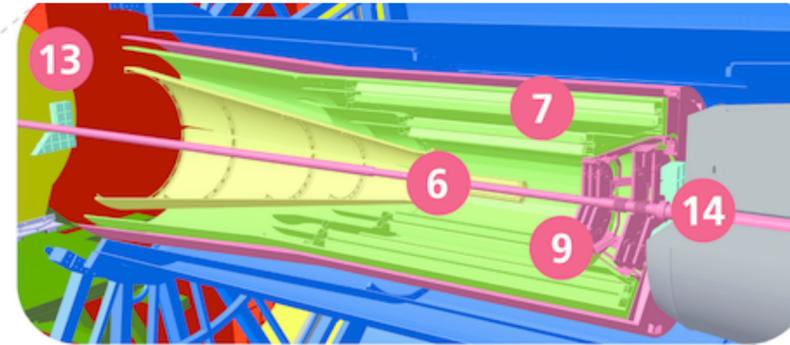
Aimant solenoïde de 0.5 T

Vertex: ITS

Reconstruction de traces: ITS, TPC

Identification de particules:

ITS, TPC, TRD, TOF, HMPID,
EMCAL, PHOS



- 1 **ACORDE** | ALICE Cosmic Rays Detector
- 2 **AD** | ALICE Diffractive Detector
- 3 **DCal** | Di-jet Calorimeter
- 4 **EMCal** | Electromagnetic Calorimeter
- 5 **HMPID** | High Momentum Particle Identification Detector
- 6 **ITS-IB** | Inner Tracking System - Inner Barrel
- 7 **ITS-OB** | Inner Tracking System - Outer Barrel
- 8 **MCH** | Muon Tracking Chambers
- 9 **MFT** | Muon Forward Tracker
- 10 **MID** | Muon Identifier
- 11 **PHOS / CPV** | Photon Spectrometer
- 12 **TOF** | Time Of Flight
- 13 **T0+A** | Tzero + A
- 14 **T0+C** | Tzero + C
- 15 **TPC** | Time Projection Chamber
- 16 **TRD** | Transition Radiation Detector
- 17 **V0+** | Vzero + Detector
- 18 **ZDC** | Zero Degree Calorimeter

A Large Ion Collider Experiment: ALICE

Tonneau central: $|\eta| < 0.9, 44^\circ < \theta < 136^\circ$

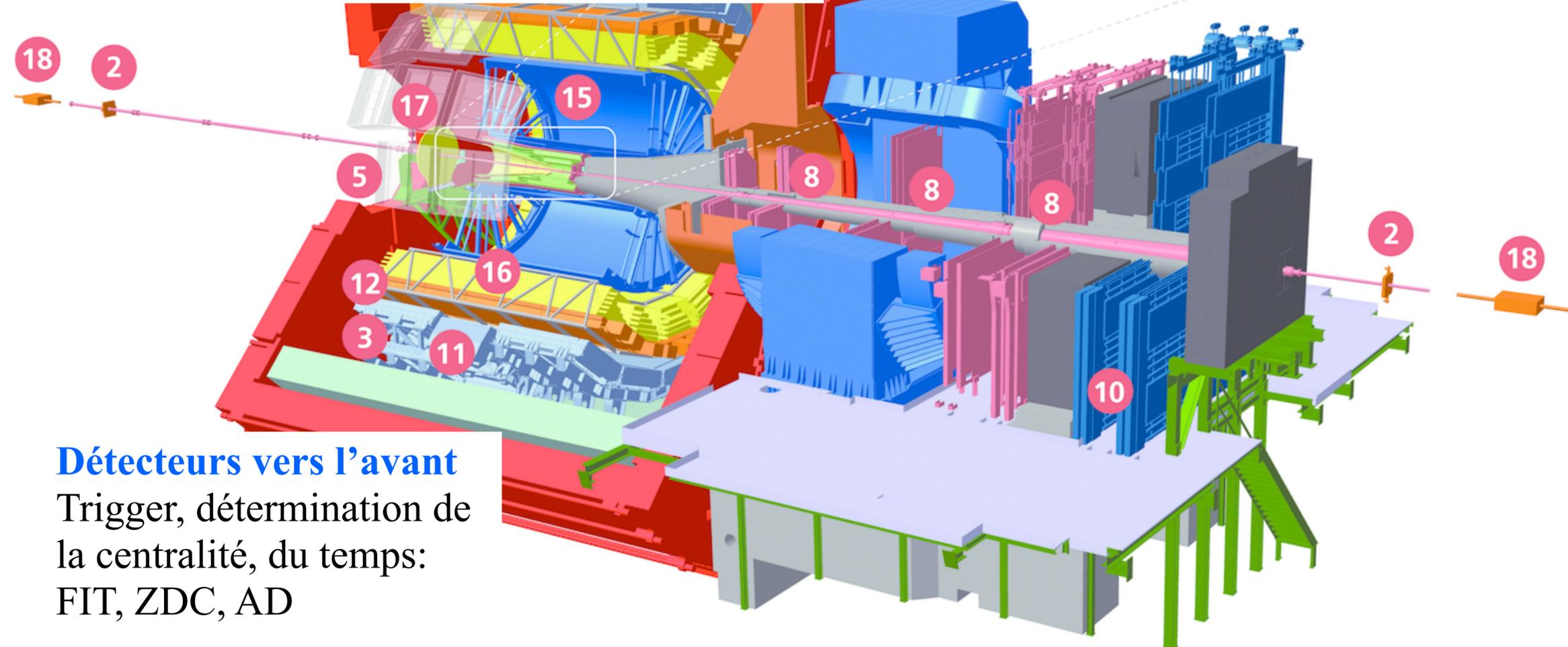
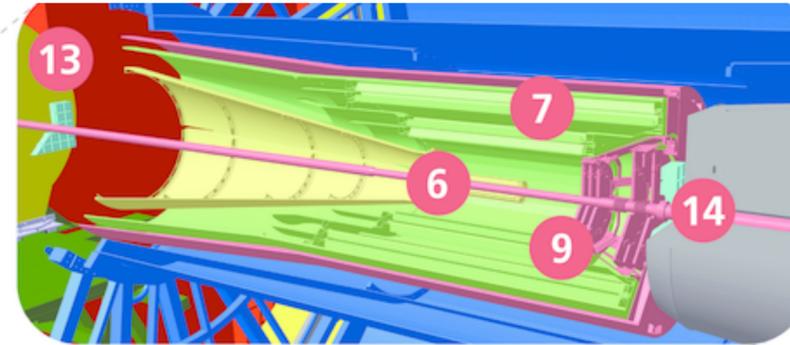
Aimant solenoïde de 0.5 T

Vertex: ITS

Reconstruction de traces: ITS, TPC

Identification de particules:

ITS, TPC, TRD, TOF, HMPID, EMCAL, PHOS



- 1 ACORDE | ALICE Cosmic Rays Detector
- 2 AD | ALICE Diffractive Detector
- 3 DCal | Di-jet Calorimeter
- 4 EMCAL | Electromagnetic Calorimeter
- 5 HMPID | High Momentum Particle Identification Detector
- 6 ITS-IB | Inner Tracking System - Inner Barrel
- 7 ITS-OB | Inner Tracking System - Outer Barrel
- 8 MCH | Muon Tracking Chambers
- 9 MFT | Muon Forward Tracker
- 10 MID | Muon Identifier
- 11 PHOS / CPV | Photon Spectrometer
- 12 TOF | Time Of Flight
- 13 T0+A | Tzero + A
- 14 T0+C | Tzero + C
- 15 TPC | Time Projection Chamber
- 16 TRD | Transition Radiation Detector
- 17 V0+ | Vzero + Detector
- 18 ZDC | Zero Degree Calorimeter

Détecteurs vers l'avant

Trigger, détermination de la centralité, du temps:

FIT, ZDC, AD

A Large Ion Collider Experiment: ALICE

Tonneau central: $|\eta| < 0.9, 44^\circ < \theta < 136^\circ$

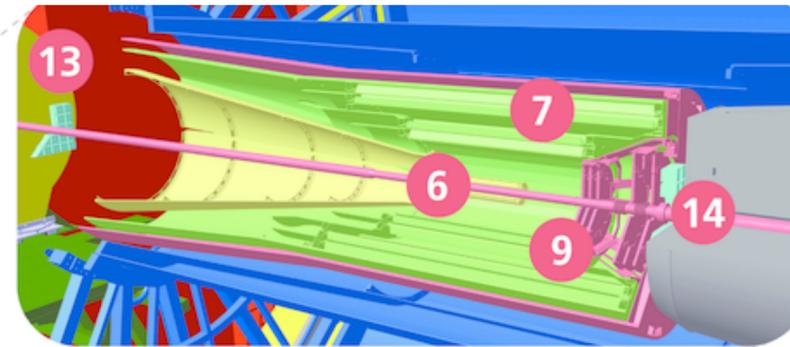
Aimant solenoïde de 0.5 T

Vertex: ITS

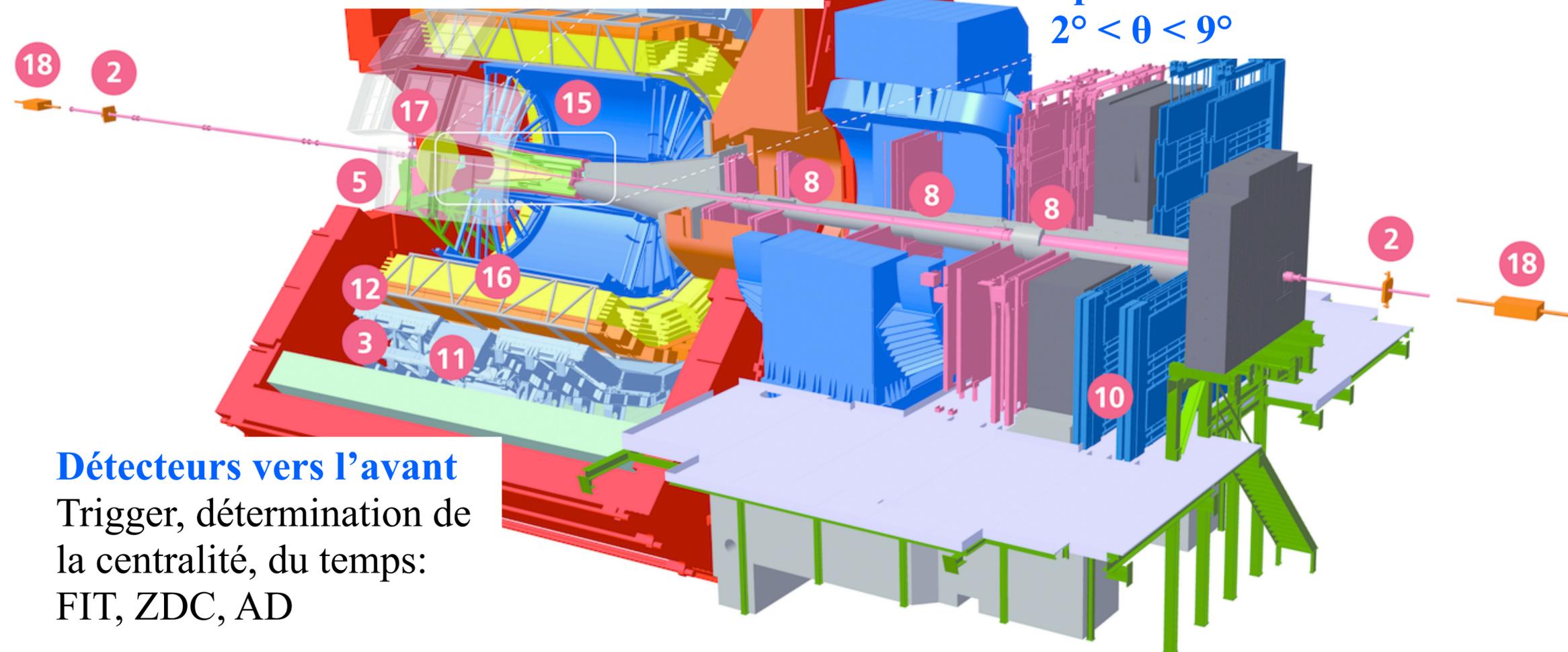
Reconstruction de traces: ITS, TPC

Identification de particules:

ITS, TPC, TRD, TOF, HMPID, EMCAL, PHOS



Spectromètre à muons: $2.5 < \eta < 4$
 $2^\circ < \theta < 9^\circ$



- 1 ACORDE | ALICE Cosmic Rays Detector
- 2 AD | ALICE Diffractive Detector
- 3 DCal | Di-jet Calorimeter
- 4 EMCAL | Electromagnetic Calorimeter
- 5 HMPID | High Momentum Particle Identification Detector
- 6 ITS-IB | Inner Tracking System - Inner Barrel
- 7 ITS-OB | Inner Tracking System - Outer Barrel
- 8 MCH | Muon Tracking Chambers
- 9 MFT | Muon Forward Tracker
- 10 MID | Muon Identifier
- 11 PHOS / CPV | Photon Spectrometer
- 12 TOF | Time Of Flight
- 13 T0+A | Tzero + A
- 14 T0+C | Tzero + C
- 15 TPC | Time Projection Chamber
- 16 TRD | Transition Radiation Detector
- 17 V0+ | Vzero + Detector
- 18 ZDC | Zero Degree Calorimeter

Détecteurs vers l'avant

Trigger, détermination de la centralité, du temps:

FIT, ZDC, AD

A Large Ion Collider Experiment: ALICE

Tonneau central: $|\eta| < 0.9, 44^\circ < \theta < 136^\circ$

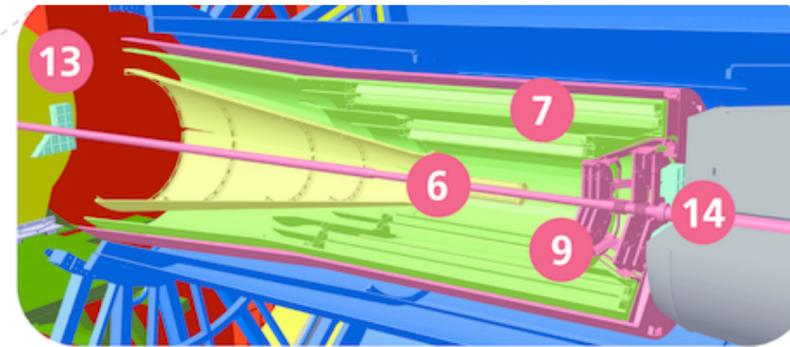
Aimant solenoïde de 0.5 T

Vertex: ITS

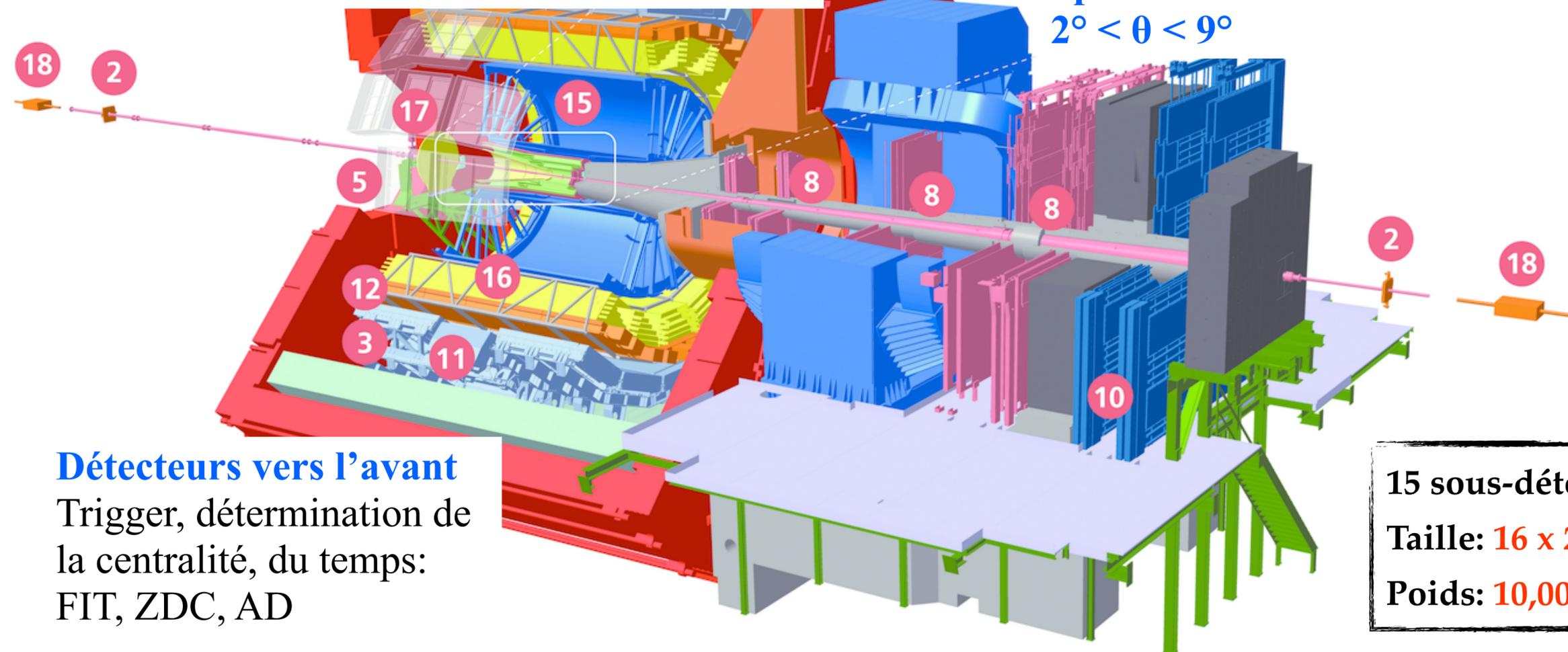
Reconstruction de traces: ITS, TPC

Identification de particules:

ITS, TPC, TRD, TOF, HMPID, EMCAL, PHOS



Spectromètre à muons: $2.5 < \eta < 4$
 $2^\circ < \theta < 9^\circ$



- 1 ACORDE | ALICE Cosmic Rays Detector
- 2 AD | ALICE Diffractive Detector
- 3 DCal | Di-jet Calorimeter
- 4 EMCAL | Electromagnetic Calorimeter
- 5 HMPID | High Momentum Particle Identification Detector
- 6 ITS-IB | Inner Tracking System - Inner Barrel
- 7 ITS-OB | Inner Tracking System - Outer Barrel
- 8 MCH | Muon Tracking Chambers
- 9 MFT | Muon Forward Tracker
- 10 MID | Muon Identifier
- 11 PHOS / CPV | Photon Spectrometer
- 12 TOF | Time Of Flight
- 13 T0+A | Tzero + A
- 14 T0+C | Tzero + C
- 15 TPC | Time Projection Chamber
- 16 TRD | Transition Radiation Detector
- 17 V0+ | Vzero + Detector
- 18 ZDC | Zero Degree Calorimeter

Détecteurs vers l'avant

Trigger, détermination de la centralité, du temps:

FIT, ZDC, AD

15 sous-détecteurs
Taille: 16 x 26 mètres
Poids: 10,000 tonnes

A Large Ion Collider Experiment: ALICE

Tonneau central: $|\eta| < 0.9, 44^\circ < \theta < 136^\circ$

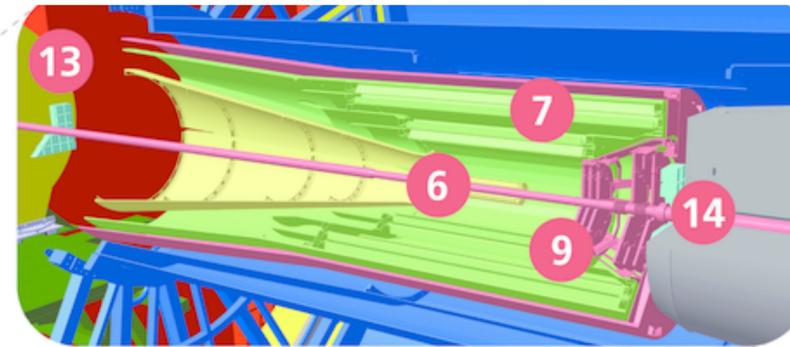
Aimant solenoïde de 0.5 T

Vertex: ITS

Reconstruction de traces: ITS, TPC

Identification de particules:

ITS, TPC, TRD, TOF, HMPID, EMCAL, PHOS

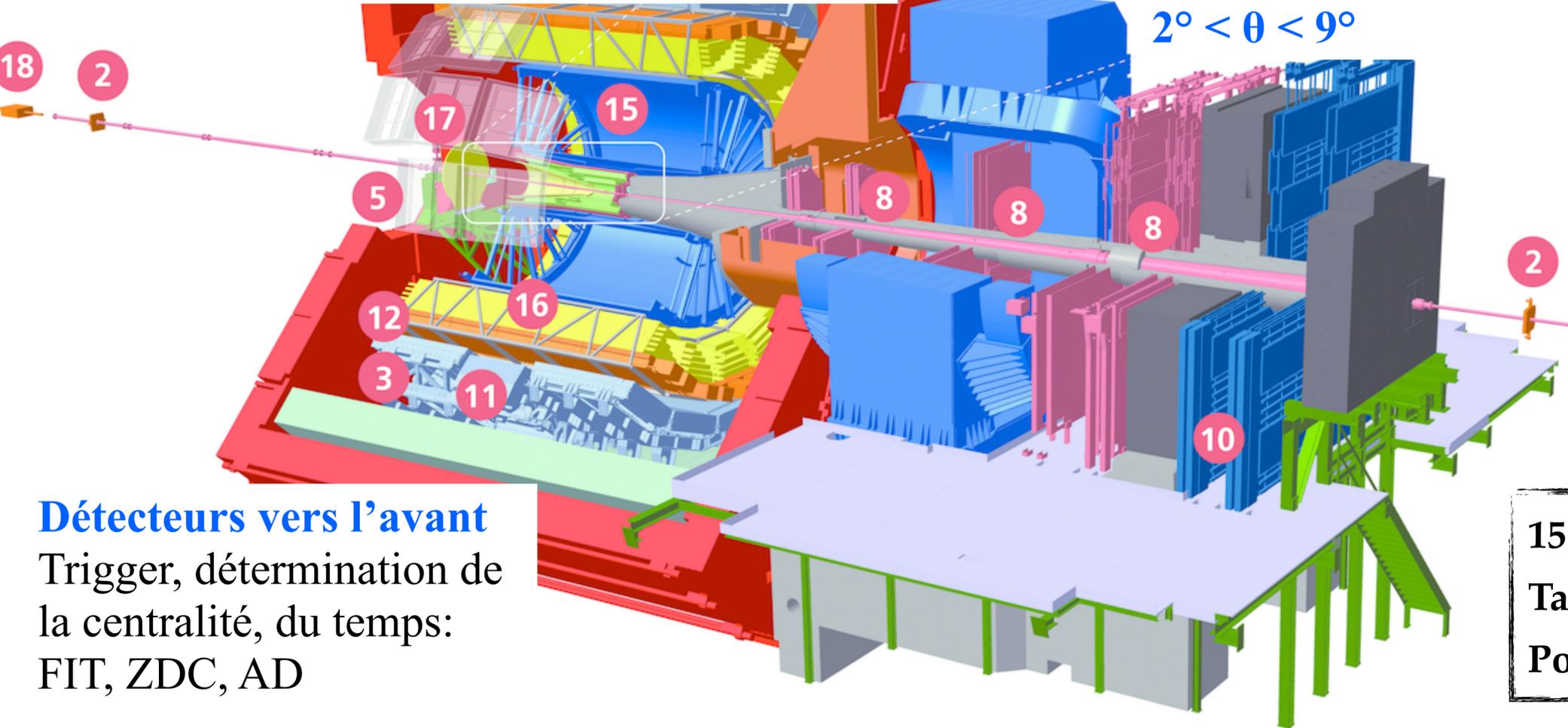


Spectromètre à muons: $2.5 < \eta < 4$
 $2^\circ < \theta < 9^\circ$

- 1 ACORDE | ALICE Cosmic Rays Detector
- 2 AD | ALICE Diffractive Detector
- 3 DCal | Di-jet Calorimeter
- 4 EMCAL | Electromagnetic Calorimeter
- 5 HMPID | High Momentum Particle Identification Detector
- 6 ITS-IB | Inner Tracking System - Inner Barrel
- 7 ITS-OB | Inner Tracking System - Outer Barrel

Hardware trigger (Run1-2) → lecture continue (Run3-4) :

- 50 kHz en Pb-Pb, 1 MHz en pp, x10-100 stat. entre Run 1-2 et 3-4)
- nouvelles électroniques de lecture
- reconstruction online (3 TB/s → 100 GB/s en Pb-Pb)



Détecteurs vers l'avant

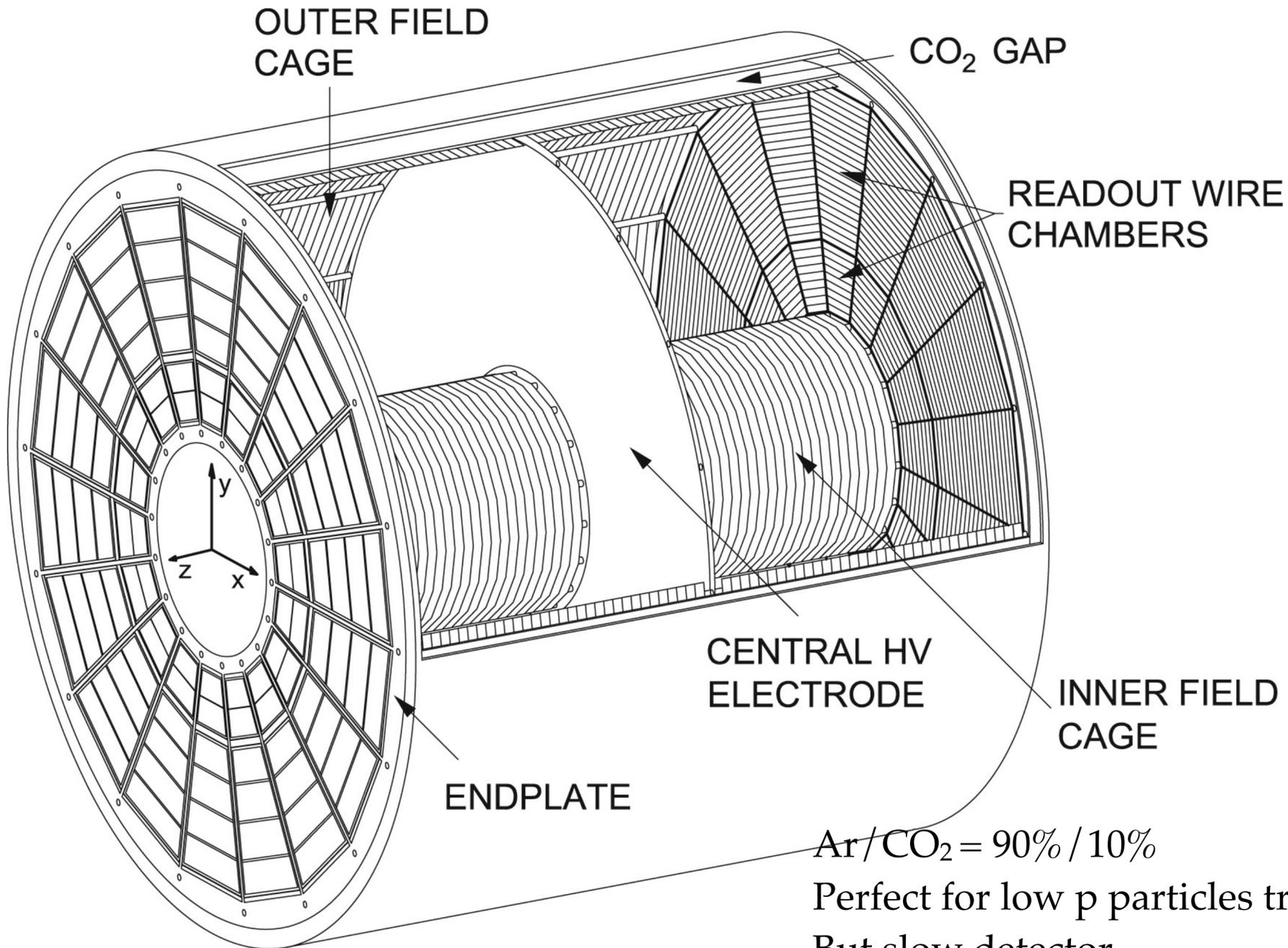
Trigger, détermination de la centralité, du temps:

FIT, ZDC, AD

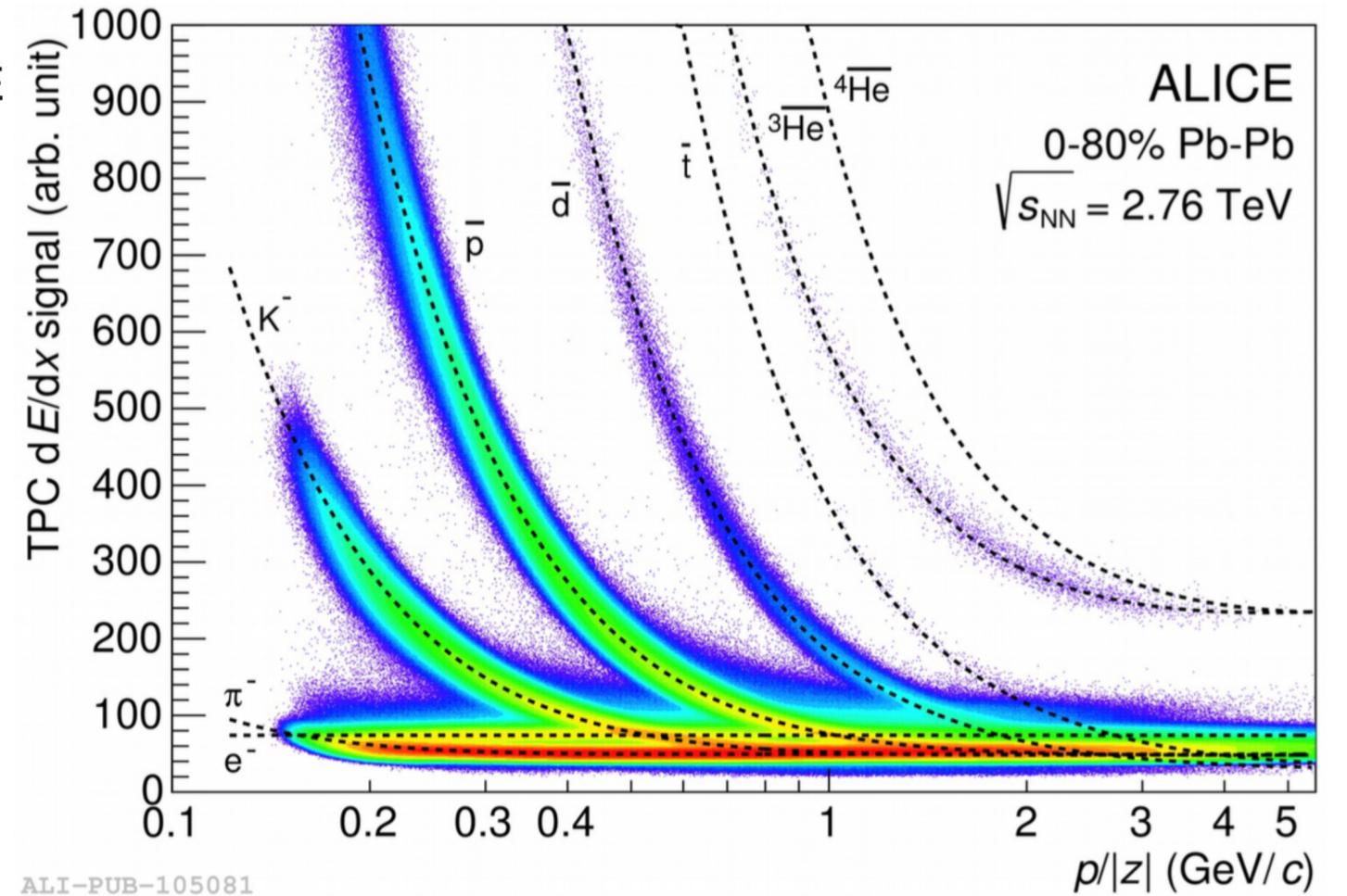
15 sous-détecteurs
Taille: 16 x 26 mètres
Poids: 10,000 tonnes

- 15 TPC | Time Projection Chamber
- 16 TRD | Transition Radiation Detector
- 17 V0+ | Vzero + Detector
- 18 ZDC | Zero Degree Calorimeter

Identification des particules : TPC



Time Projection Chamber (TPC)



Ar/CO₂ = 90% / 10%

Perfect for low p particles tracking and PID !

But slow detector

Drift time ~ 90 μs

Anti-helium 3 and 4 detection
Nature Physics (Anti-Helium 3)

ALI-PUB-105081

Identification des particules : TPC

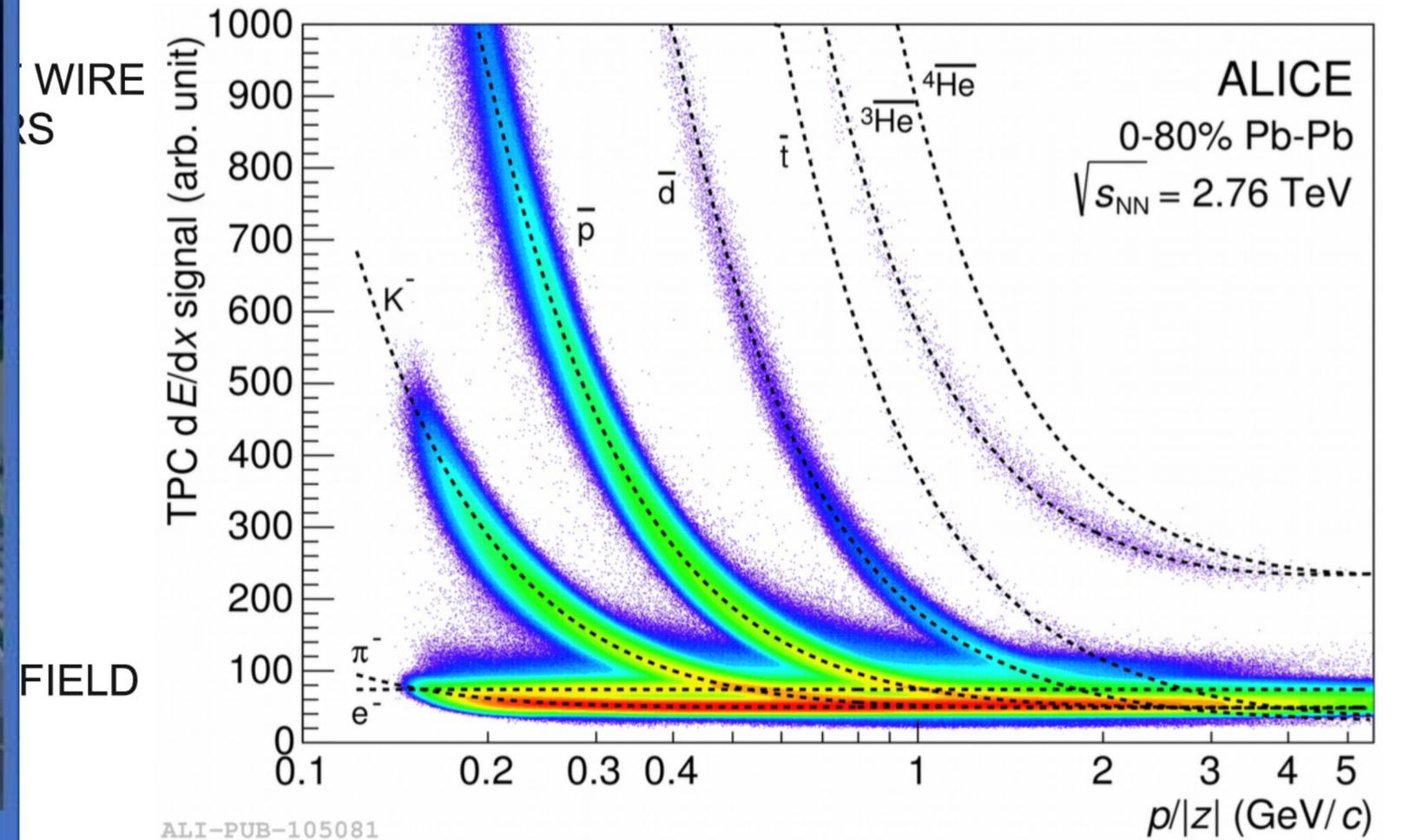
OUTER FIELD
CAGE

CO₂ GAP



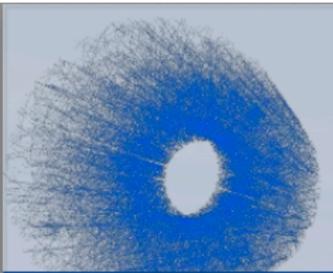
Time Projection Chamber (TPC)

Time Projection Chamber (TPC)



perfect for low p particles tracking and PID !
But slow detector
Drift time ~ 90 μs

Anti-helium 3 and 4 detection
Nature Physics (Anti-Helium 3)



Alice in Run 3

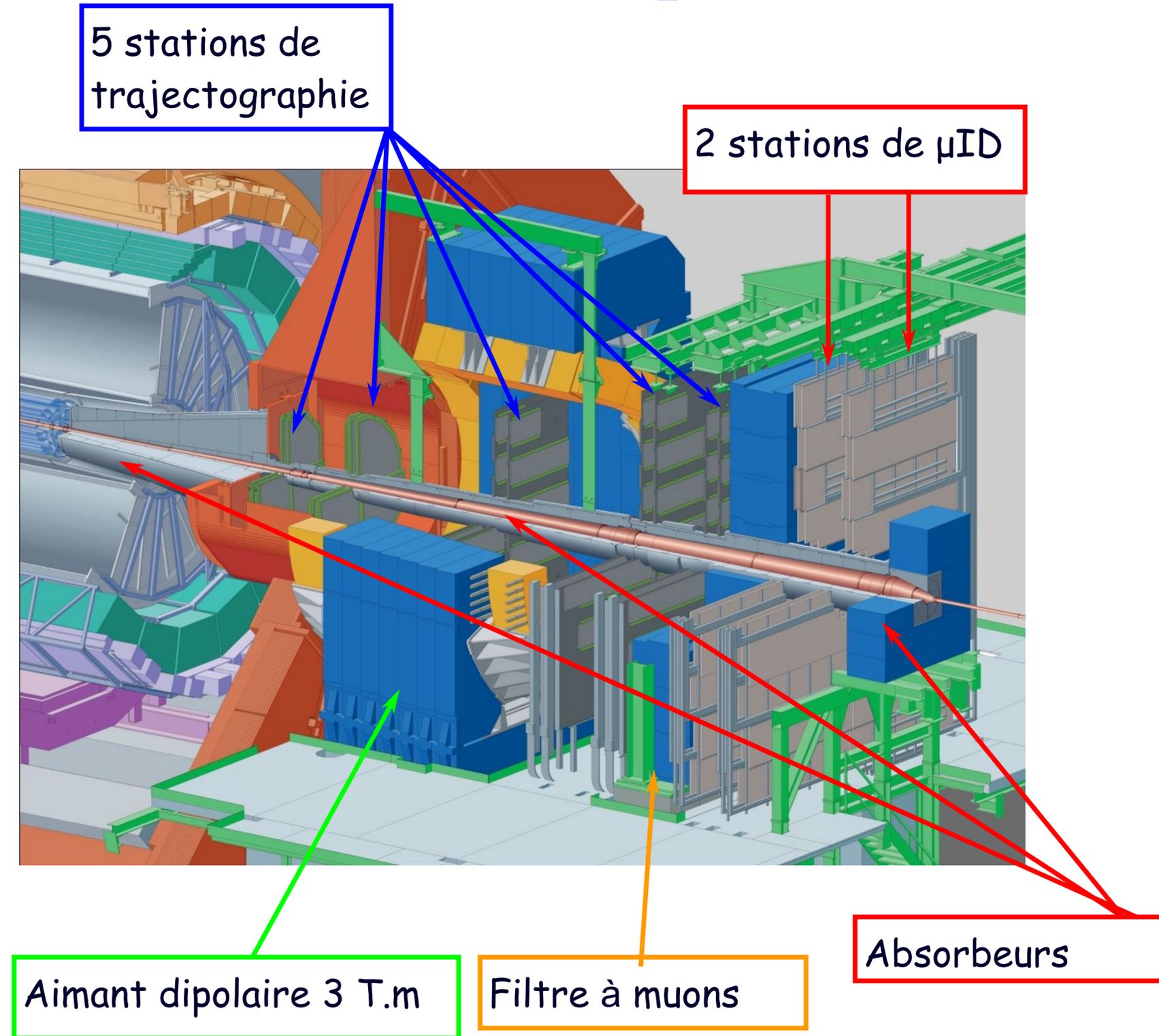


Record large minimum bias sample.

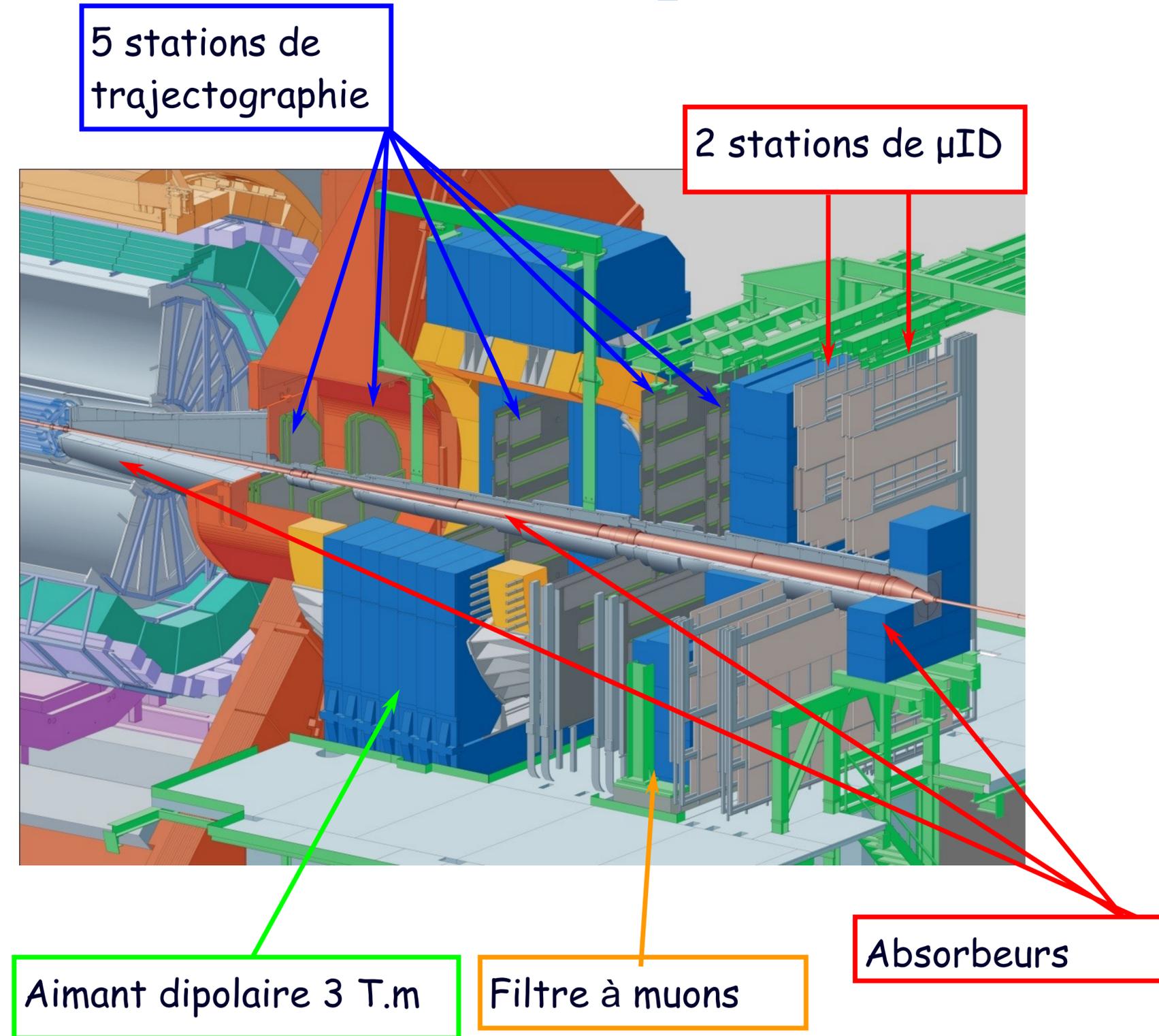
- All collisions stored for main detectors → **no trigger**.
- **Continuous readout** → data in drift detectors overlap.
- **50x** more events, **50x** more data.
- Cannot store all raw data → **online compression**.
- Use **GPUs** to speed up online processing.

- Overlapping events in TPC with realistic bunch structure @ 50 kHz Pb-Pb.
- Timeframe of 2 ms shown (will be 10 – 20 ms in production).
- Tracks of different collisions shown in different colors.

Le spectromètre à muons

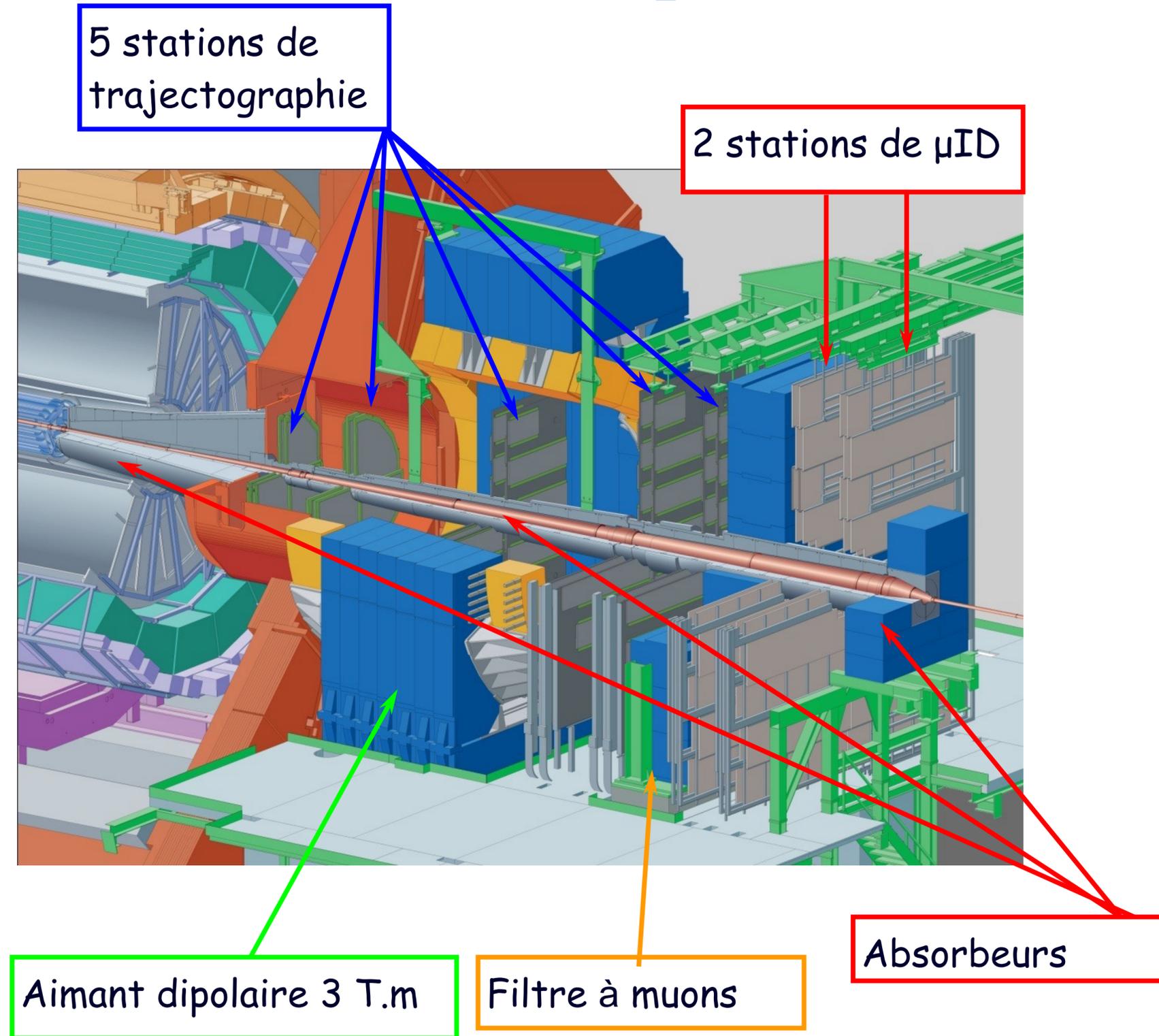


Le spectromètre à muons



Spectromètre dédié à la mesure des (di)muons produits vers l'avant : $2.5 < \eta < 4$ et en collisions d'ions lourds

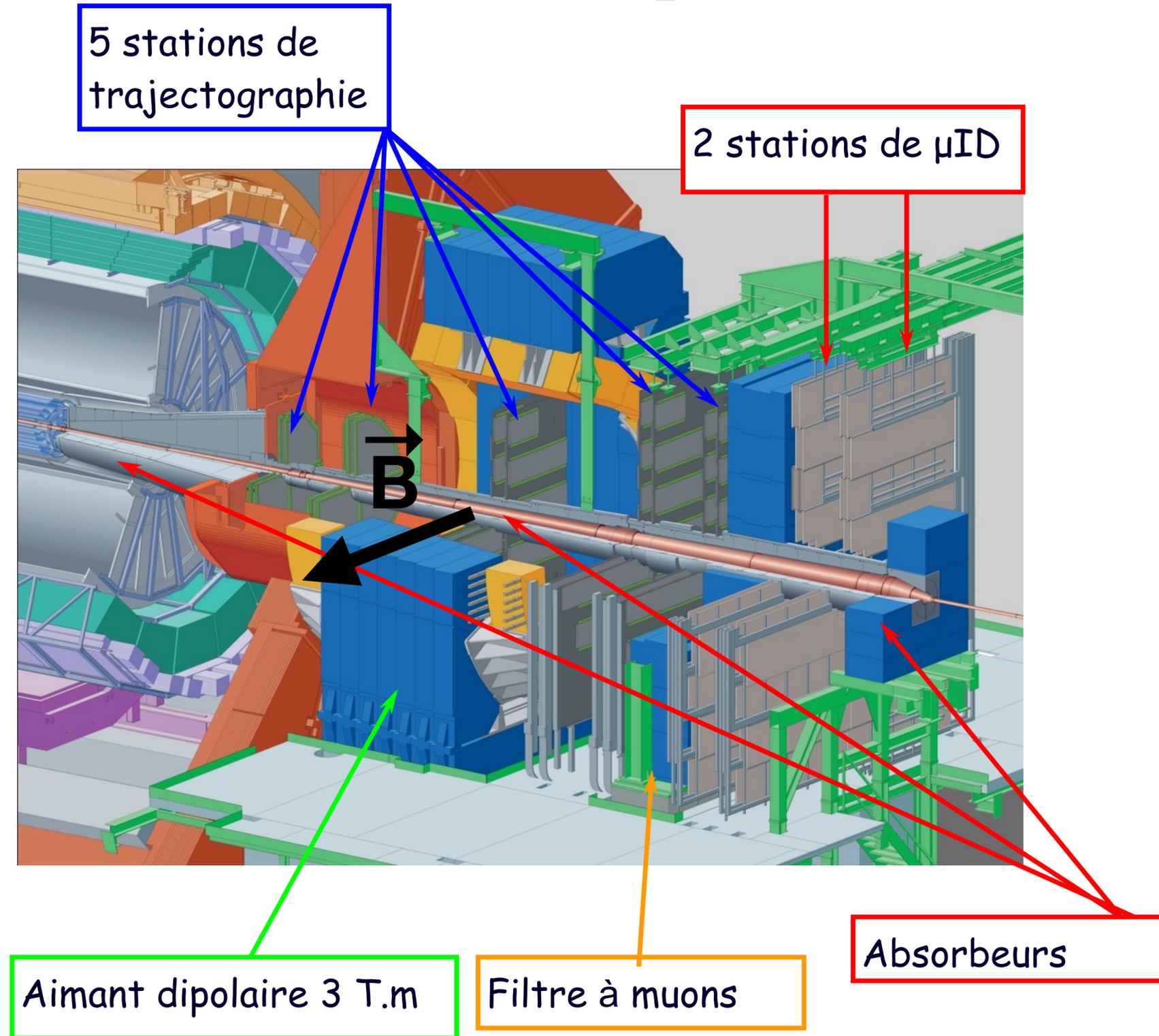
Le spectromètre à muons



Spectromètre dédié à la mesure des (di)muons produits vers l'avant : $2.5 < \eta < 4$ et en collisions d'ions lourds

Les particules chargées sont déviées par le champ magnétique, B , généré par l'aimant dipolaire (force de Lorentz : $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$)

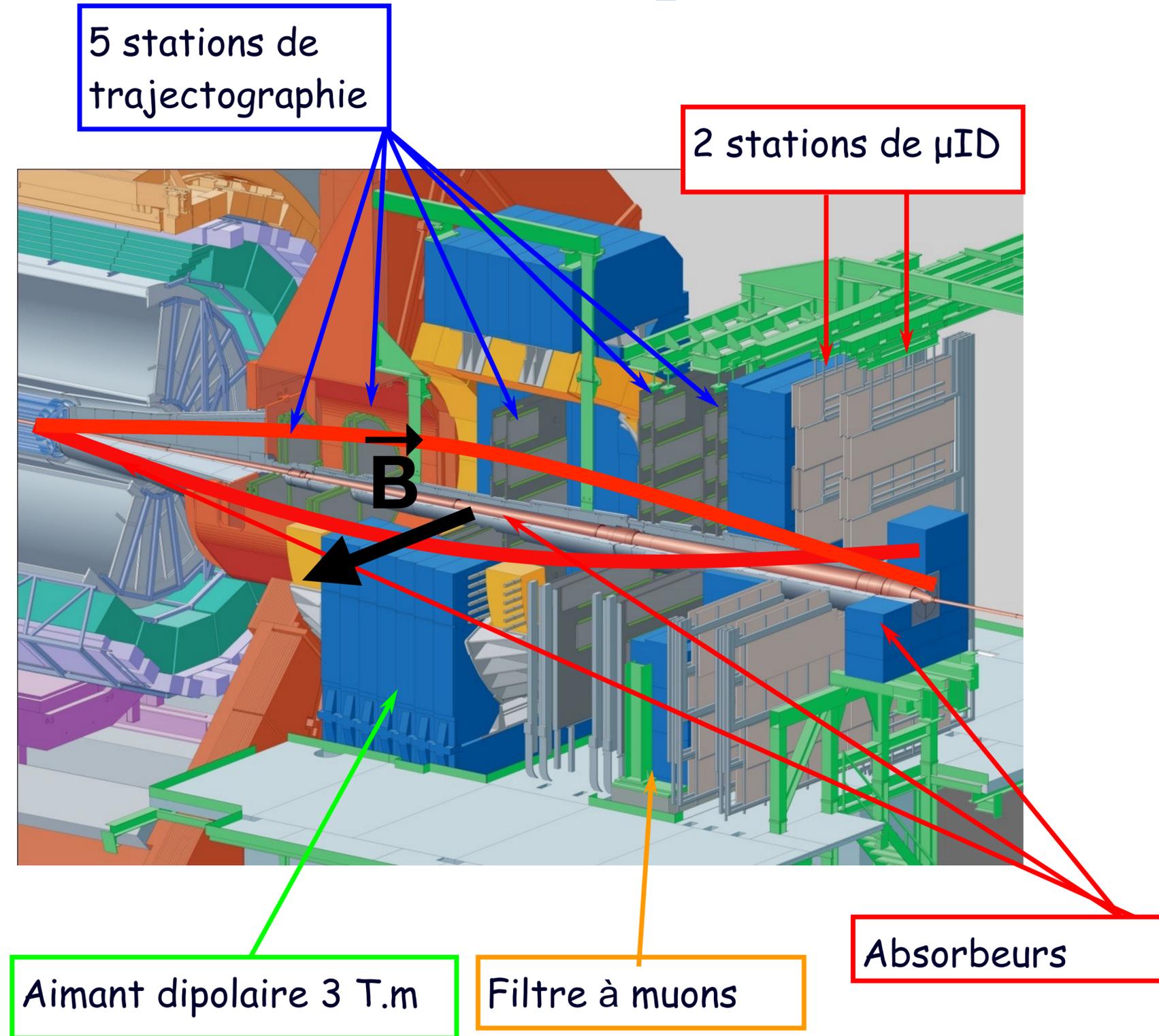
Le spectromètre à muons



Spectromètre dédié à la mesure des (di)muons produits vers l'avant : $2.5 < \eta < 4$ et en collisions d'ions lourds

Les particules chargées sont déviées par le champ magnétique, B , généré par l'aimant dipolaire (force de Lorentz : $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$)

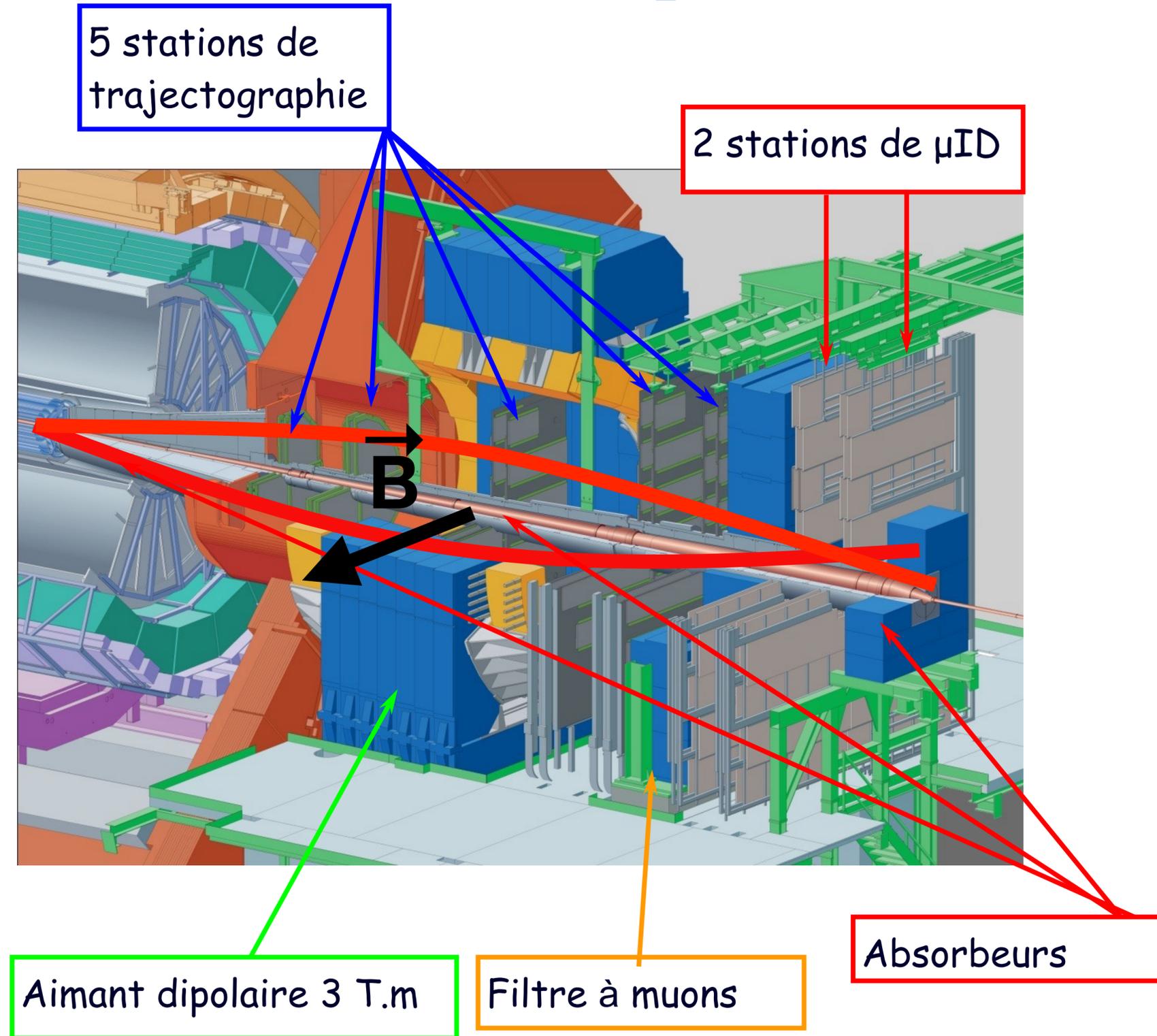
Le spectromètre à muons



Spectromètre dédié à la mesure des (di)muons produits vers l'avant : $2.5 < \eta < 4$ et en collisions d'ions lourds

Les particules chargées sont déviées par le champ magnétique, B , généré par l'aimant dipolaire (force de Lorentz : $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$)

Le spectromètre à muons

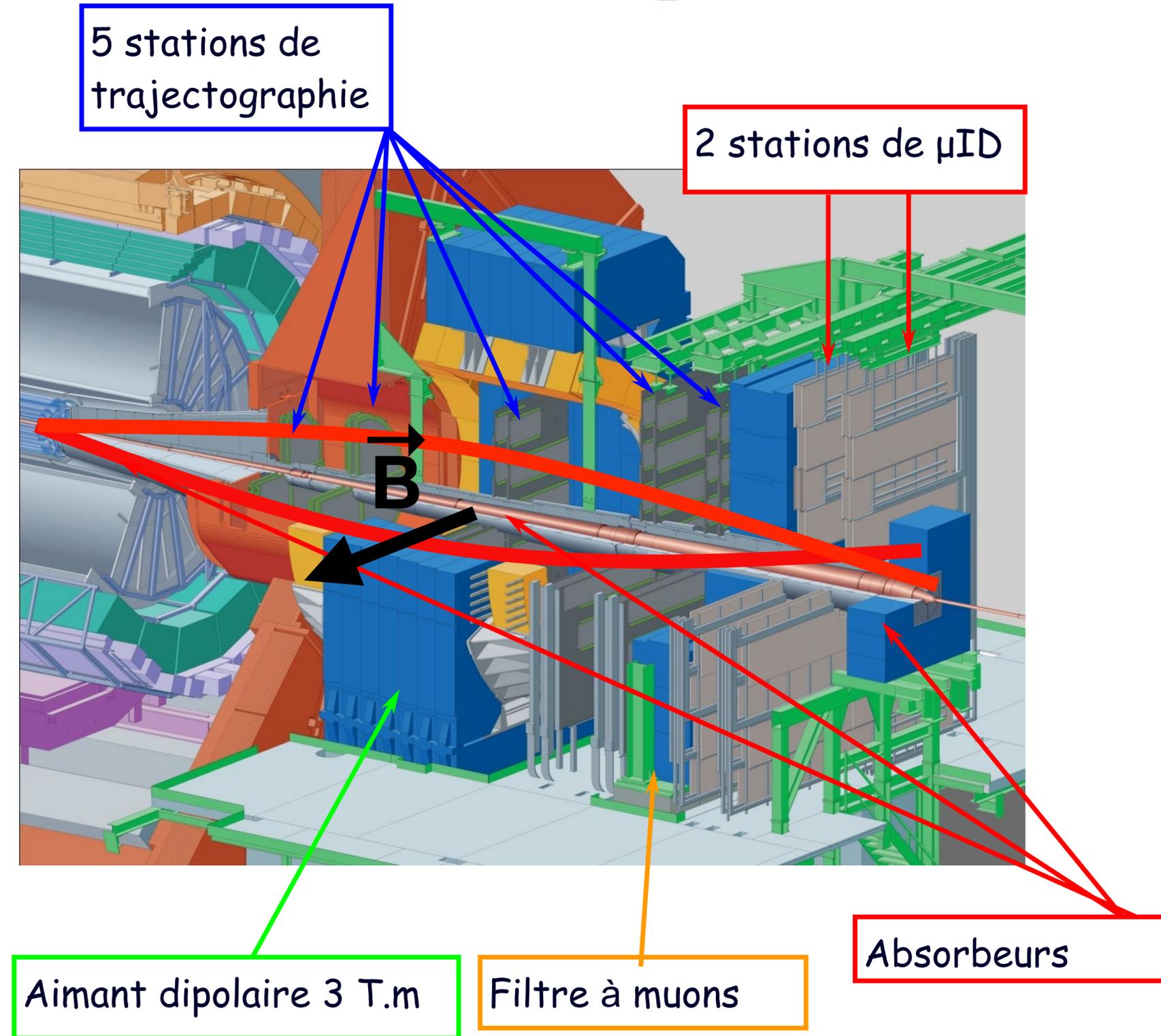


Spectromètre dédié à la mesure des (di)muons produits vers l'avant : $2.5 < \eta < 4$ et en collisions d'ions lourds

Les particules chargées sont déviées par le champ magnétique, B , généré par l'aimant dipolaire (force de Lorentz : $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$)

Les stations de trajectographie reconstruisent le parcours des particules chargées (10 points) et avec la valeur de B , on peut en déduire la quantité de mouvement, p , des particules

Le spectromètre à muons



Spectromètre dédié à la mesure des (di)muons produits vers l'avant : $2.5 < \eta < 4$ et en collisions d'ions lourds

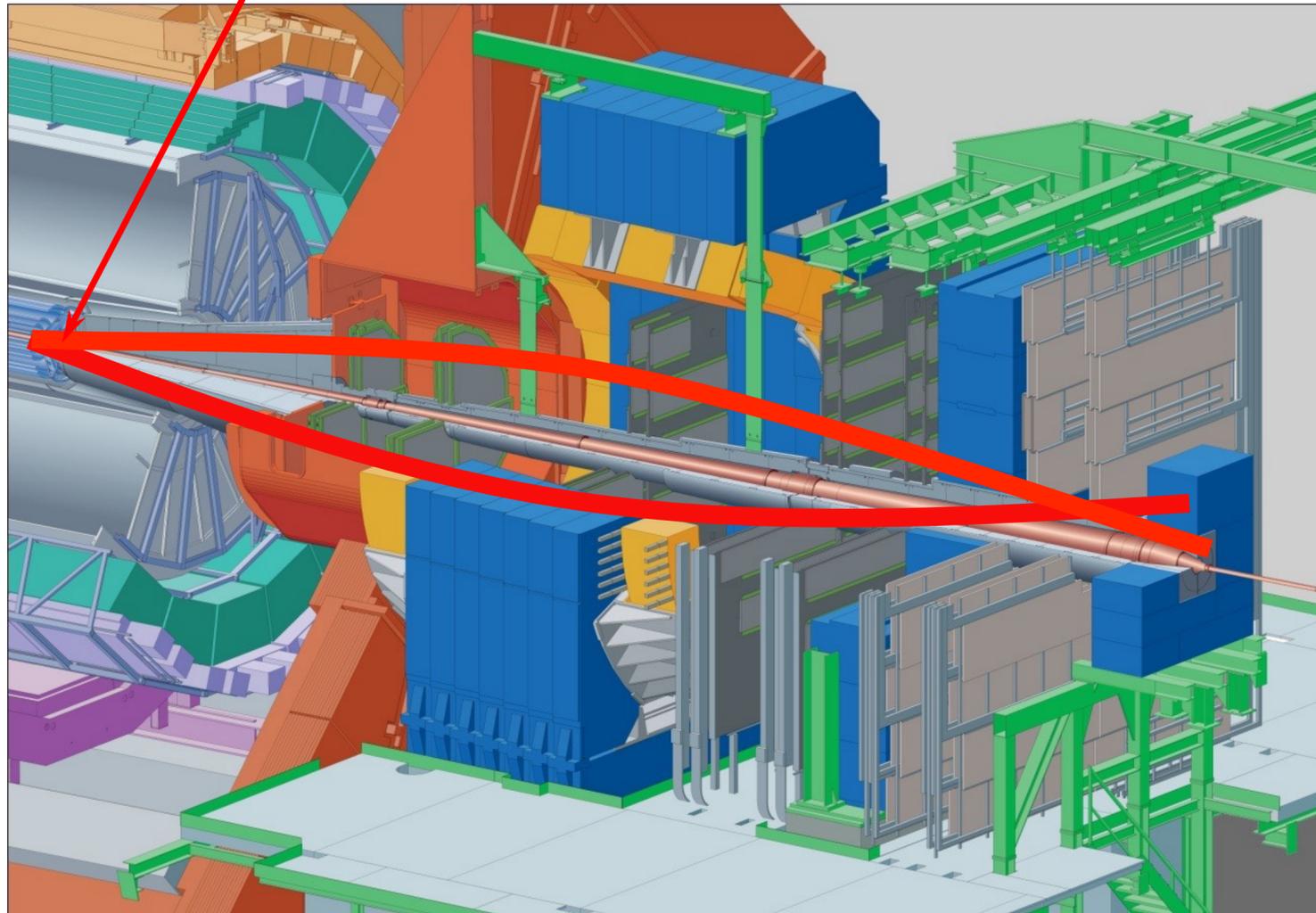
Les particules chargées sont déviées par le champ magnétique, B , généré par l'aimant dipolaire (force de Lorentz : $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$)

Les stations de trajectographie reconstruisent le parcours des particules chargées (10 points) et avec la valeur de B , on peut en déduire la quantité de mouvement, p , des particules

Les stations de Muon Identification (MID) permettent d'identifier les muons (filtre à muons)

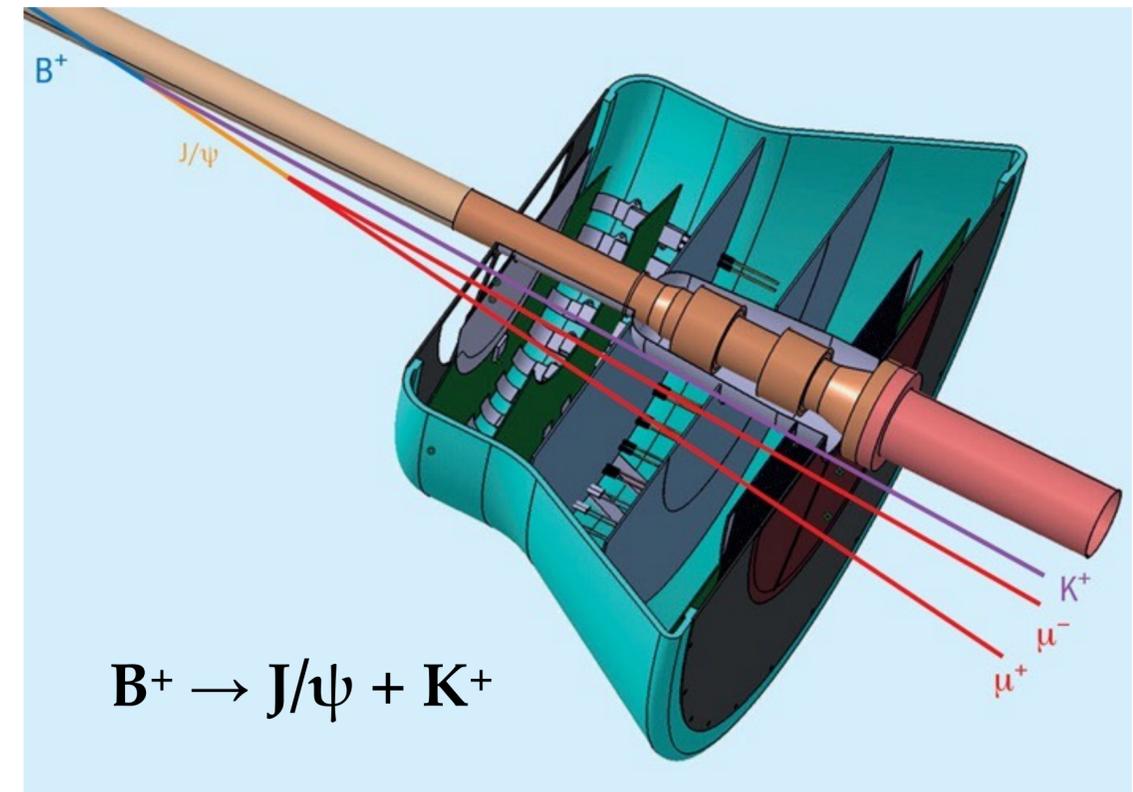
Le spectromètre à muons : nouveauté Run3/4

Muon Forward Tracker (MFT)



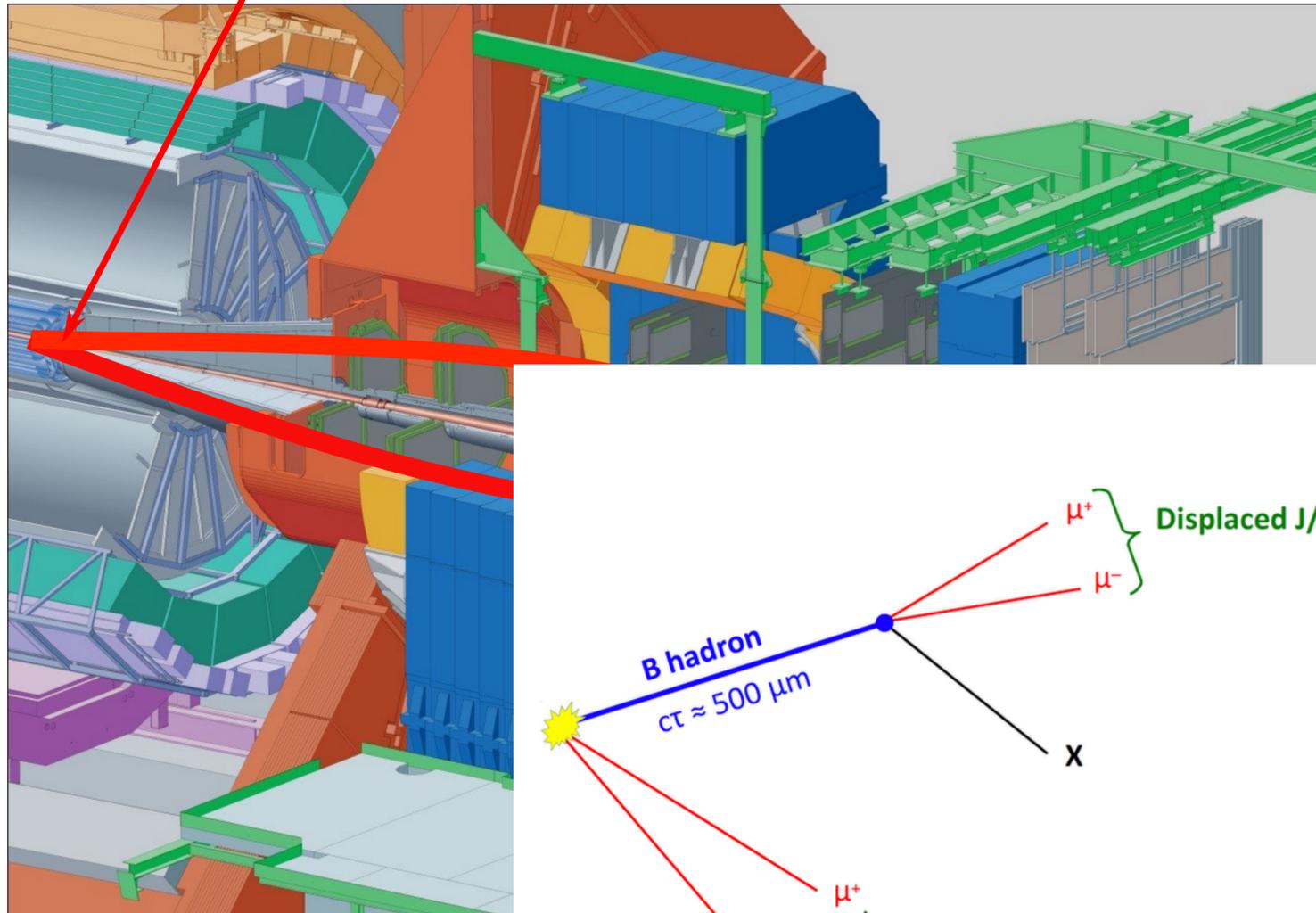
Upgrade Run3/4 (2021-2033) :

- Nouveau tracker silicium : Muon Forward Tracker (MFT) pour reconstruire le vertex secondaire pour des mesures de $B \rightarrow J/\psi$



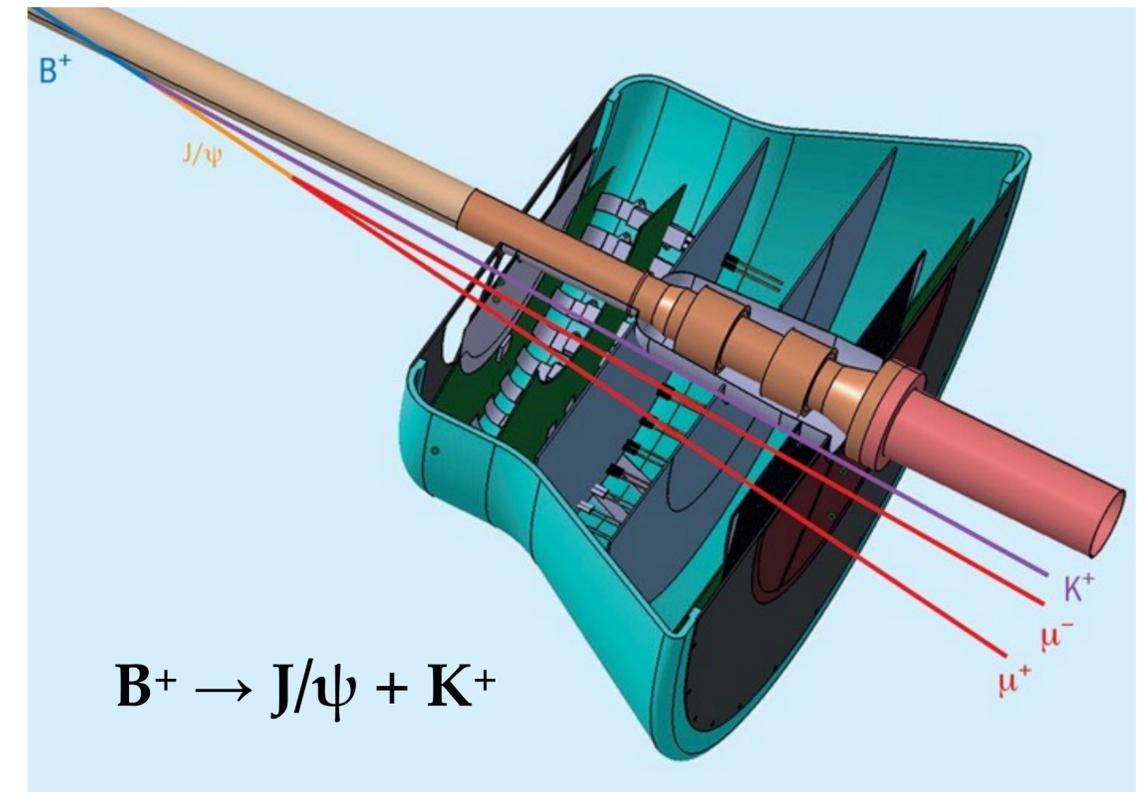
Le spectromètre à muons : nouveauté Run3/4

Muon Forward Tracker (MFT)



Upgrade Run3/4 (2021-2033) :

- Nouveau tracker silicium : Muon Forward Tracker (MFT) pour reconstruire le vertex secondaire pour des mesures de $B \rightarrow J/\psi$



Le spectromètre à muons

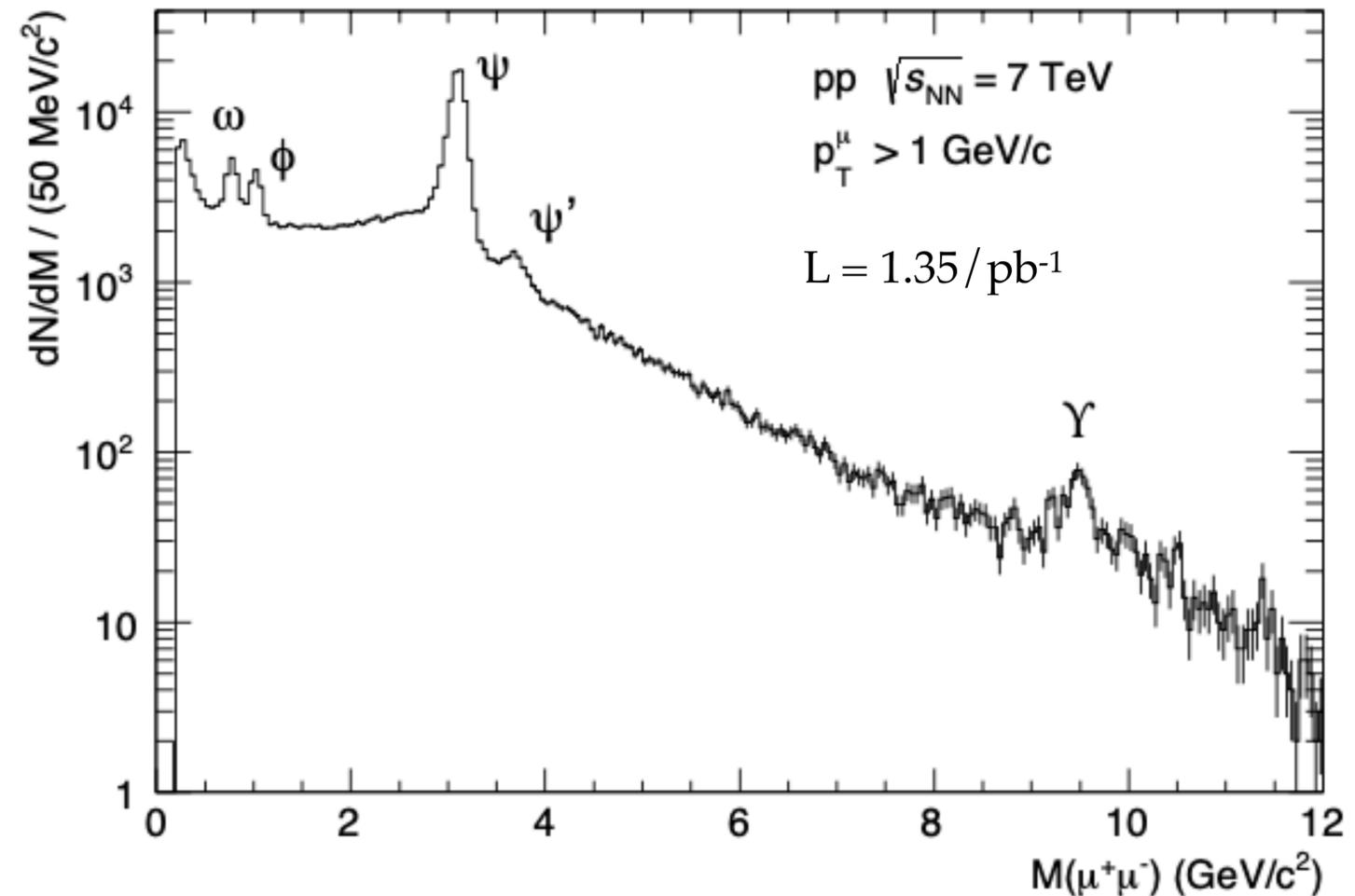
Objectif : mesurer la production de charmonia (J/ψ , $\psi(2S)$) et de bottomonia ($\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ et $\Upsilon(3S)$) dans le canal de désintégration en dimuons ($\mu^+\mu^-$)

$$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$$

$$M_{\mu\mu} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Besoins :

- acquisition rapide (faibles sections efficaces)
- reconstruction à haute multiplicité de particules produites lors de collisions Pb-Pb
- séparer les trois $\Upsilon(nS)$



Le spectromètre à muons

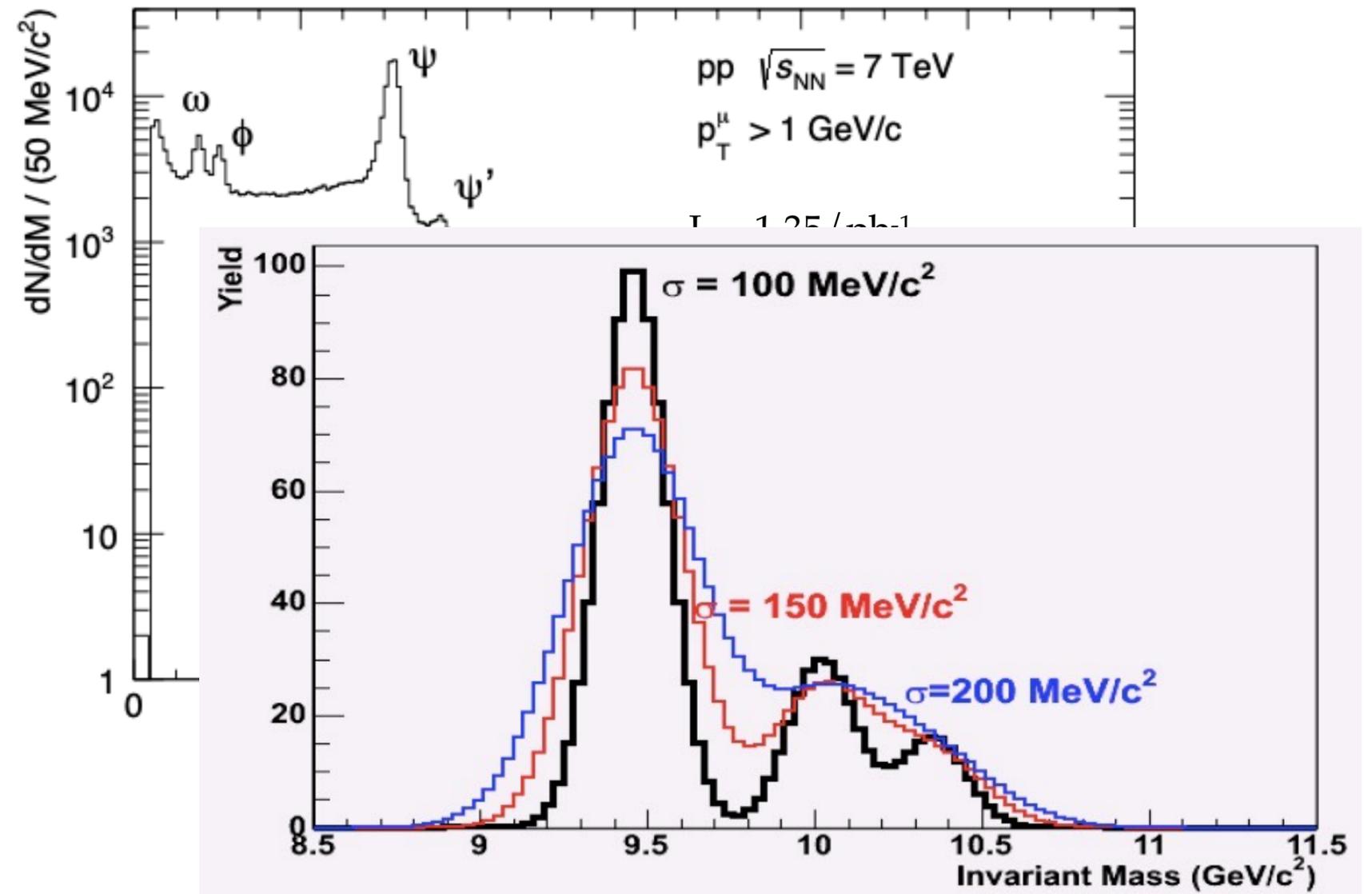
Objectif : mesurer la production de charmonia (J/ψ , $\psi(2S)$) et de bottomonia ($\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ et $\Upsilon(3S)$) dans le canal de désintégration en dimuons ($\mu^+\mu^-$)

$$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$$

$$M_{\mu\mu} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Besoins :

- acquisition rapide (faibles sections efficaces)
- reconstruction à haute multiplicité de particules produites lors de collisions Pb-Pb
- séparer les trois $\Upsilon(nS)$



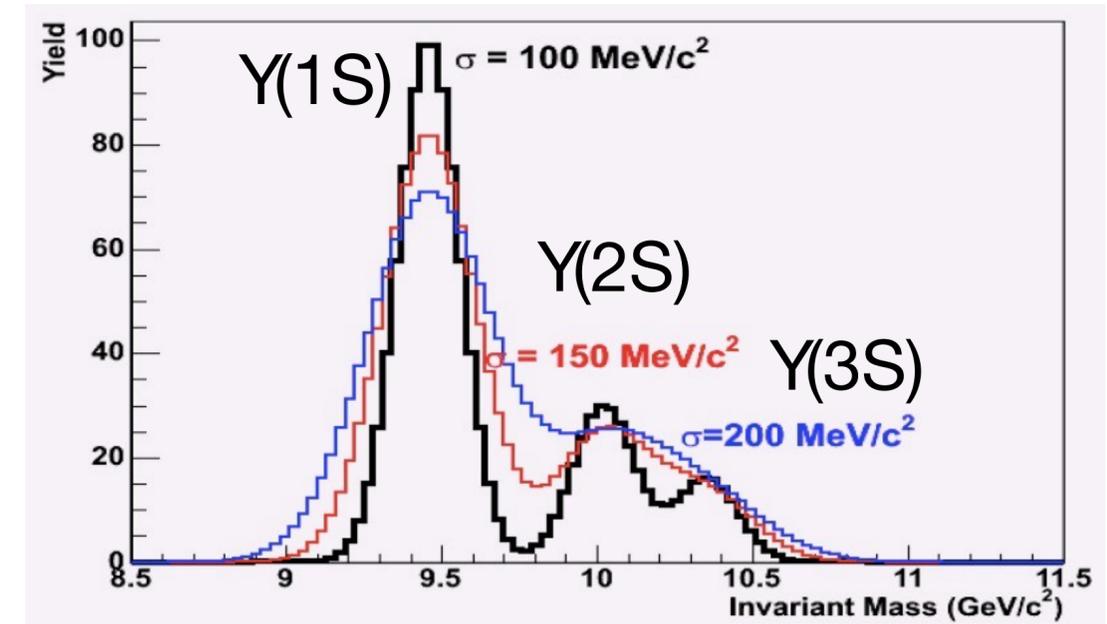
Caractéristiques du spectromètre à muons

Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographie.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

→ ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :



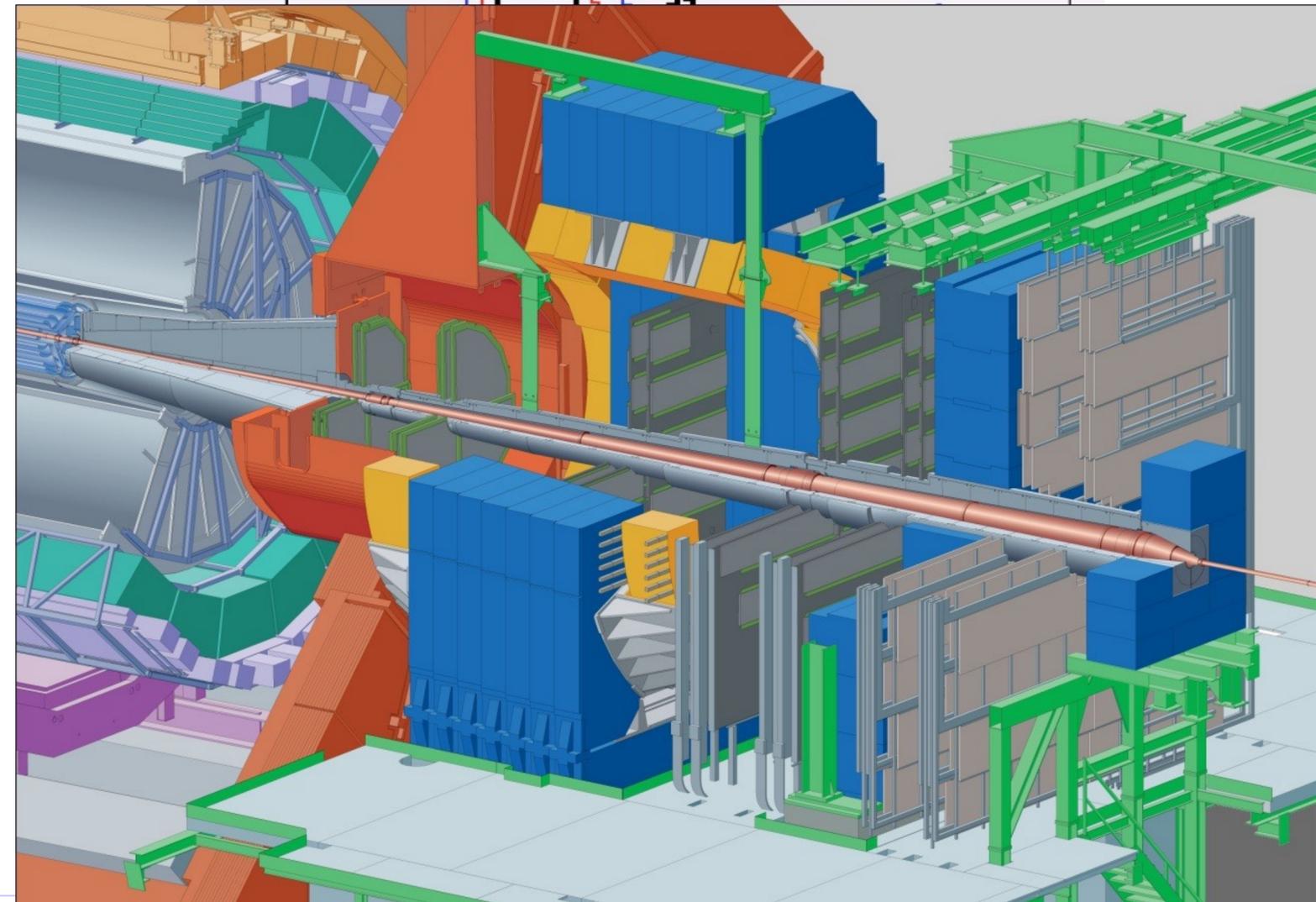
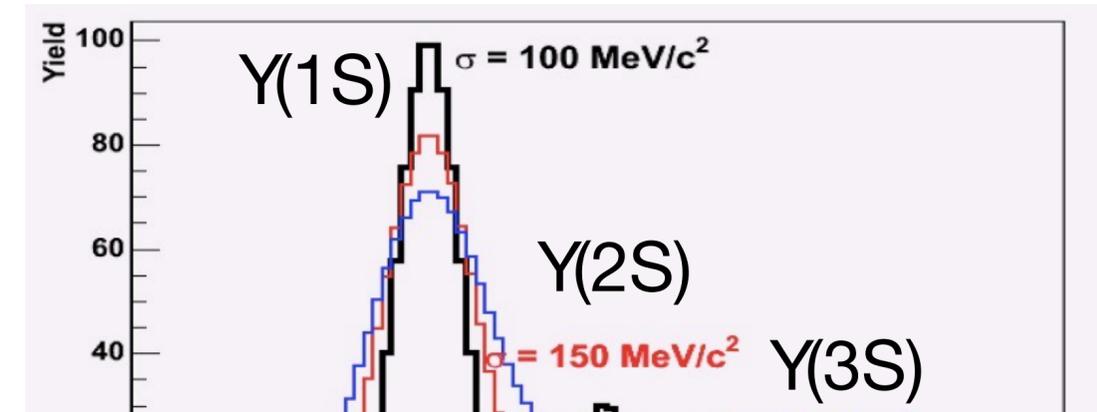
Caractéristiques du spectromètre à muons

Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographique.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

- ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :
- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B



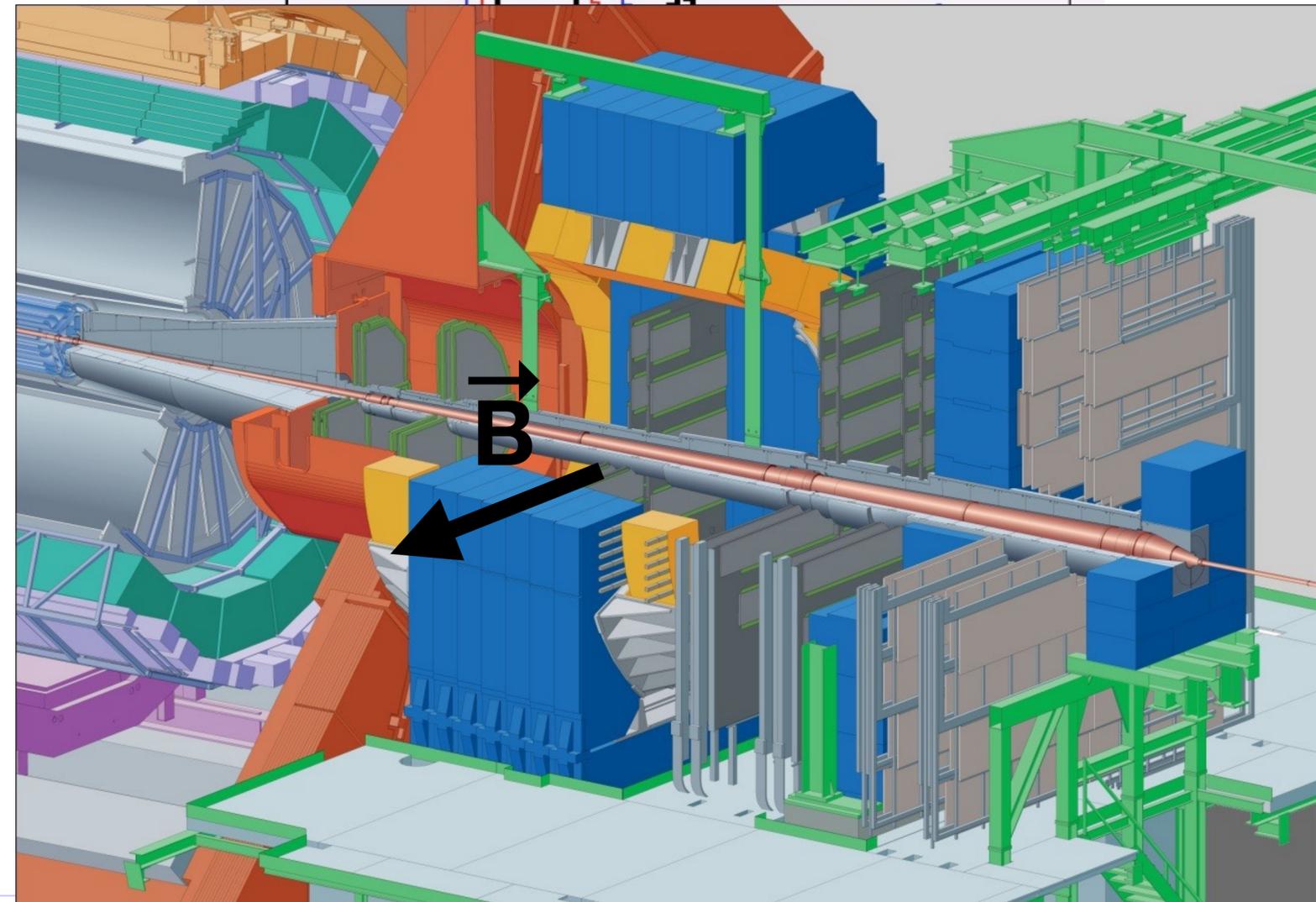
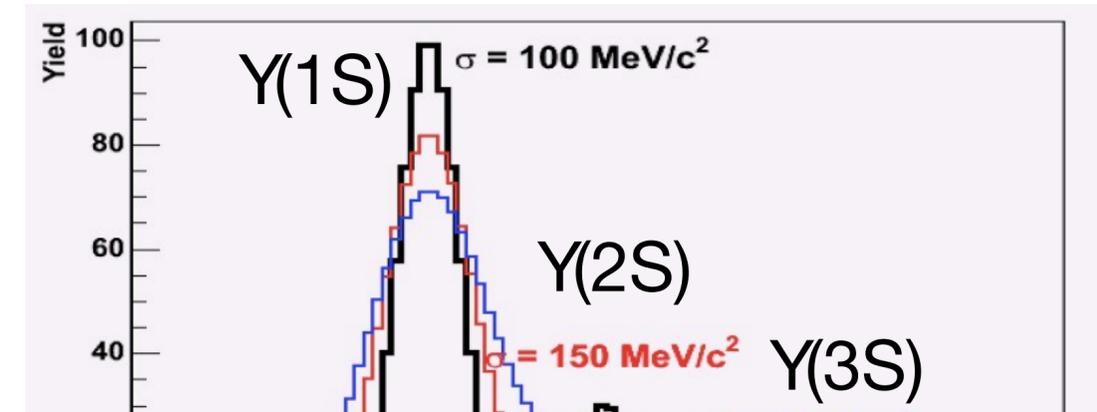
Caractéristiques du spectromètre à muons

Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographique.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

- ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :
- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B



Caractéristiques du spectromètre à muons

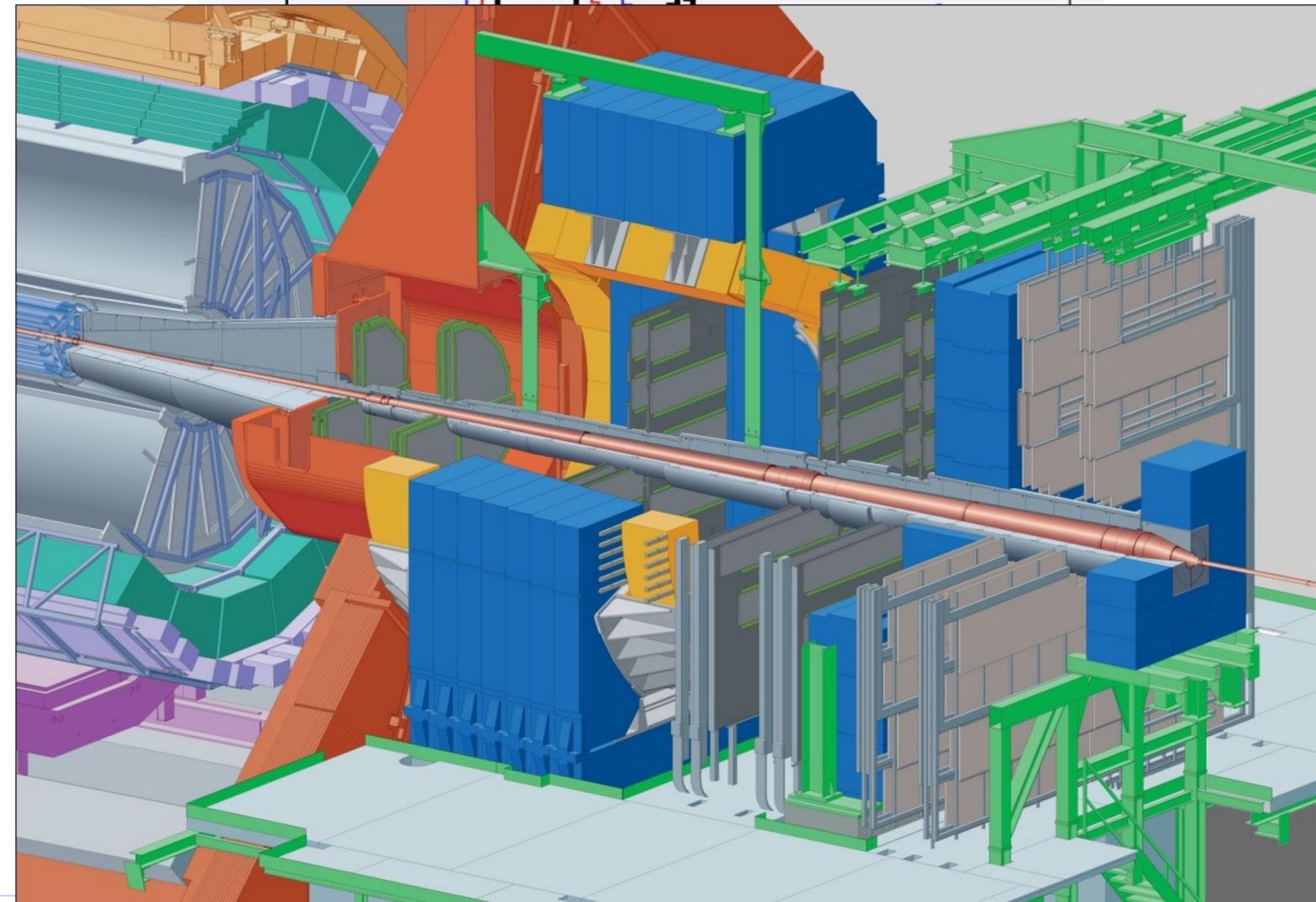
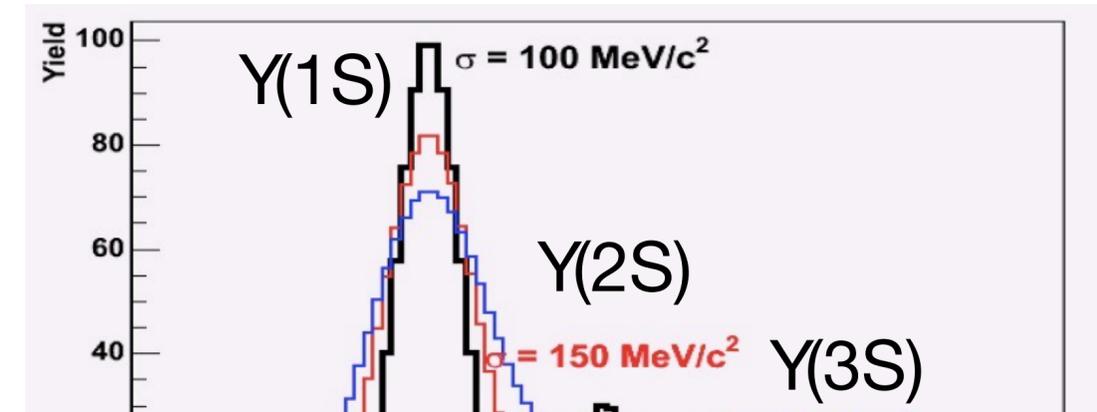
Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographique.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

→ ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :

- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B
- la composition de l'absorbeur frontal (et le budget de matière global du détecteur)



Caractéristiques du spectromètre à muons

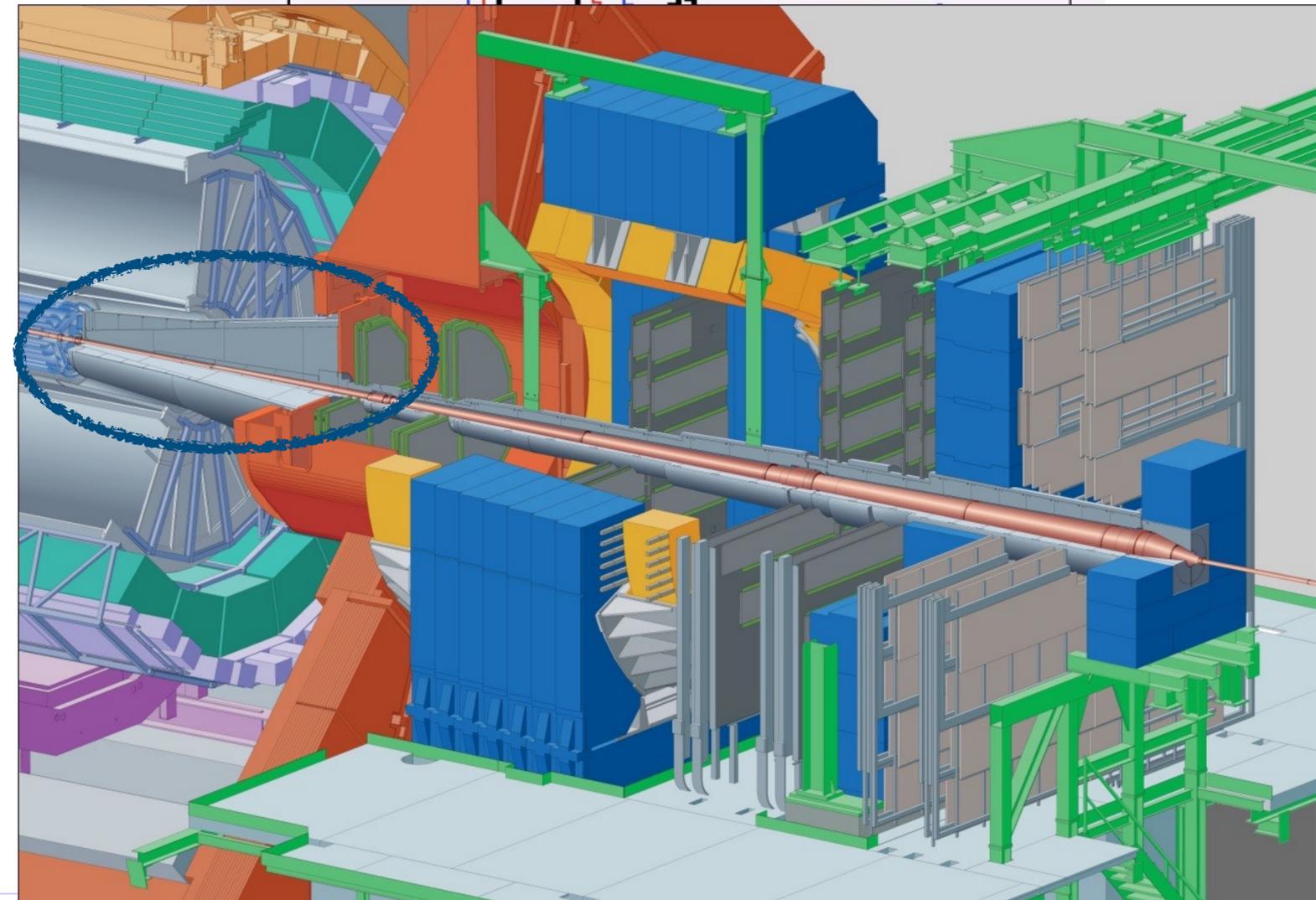
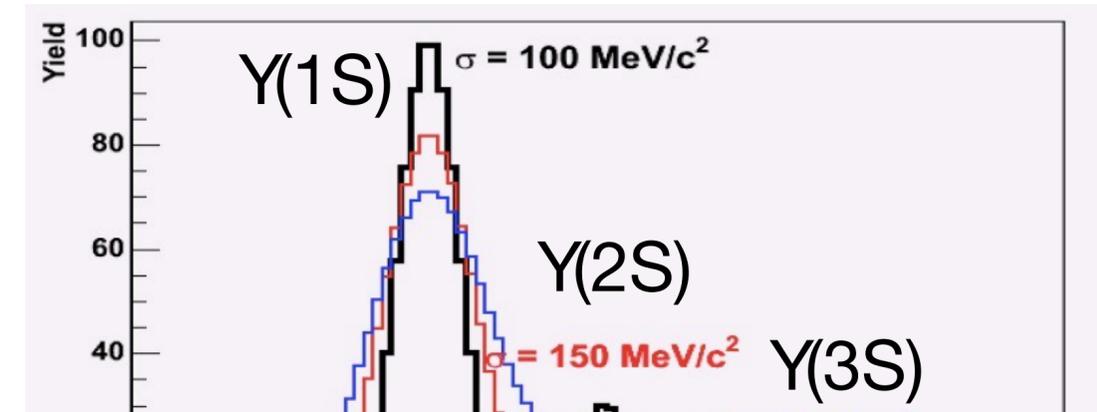
Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographique.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

→ ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :

- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B
- la composition de l'absorbeur frontal (et le budget de matière global du détecteur)



Caractéristiques du spectromètre à muons

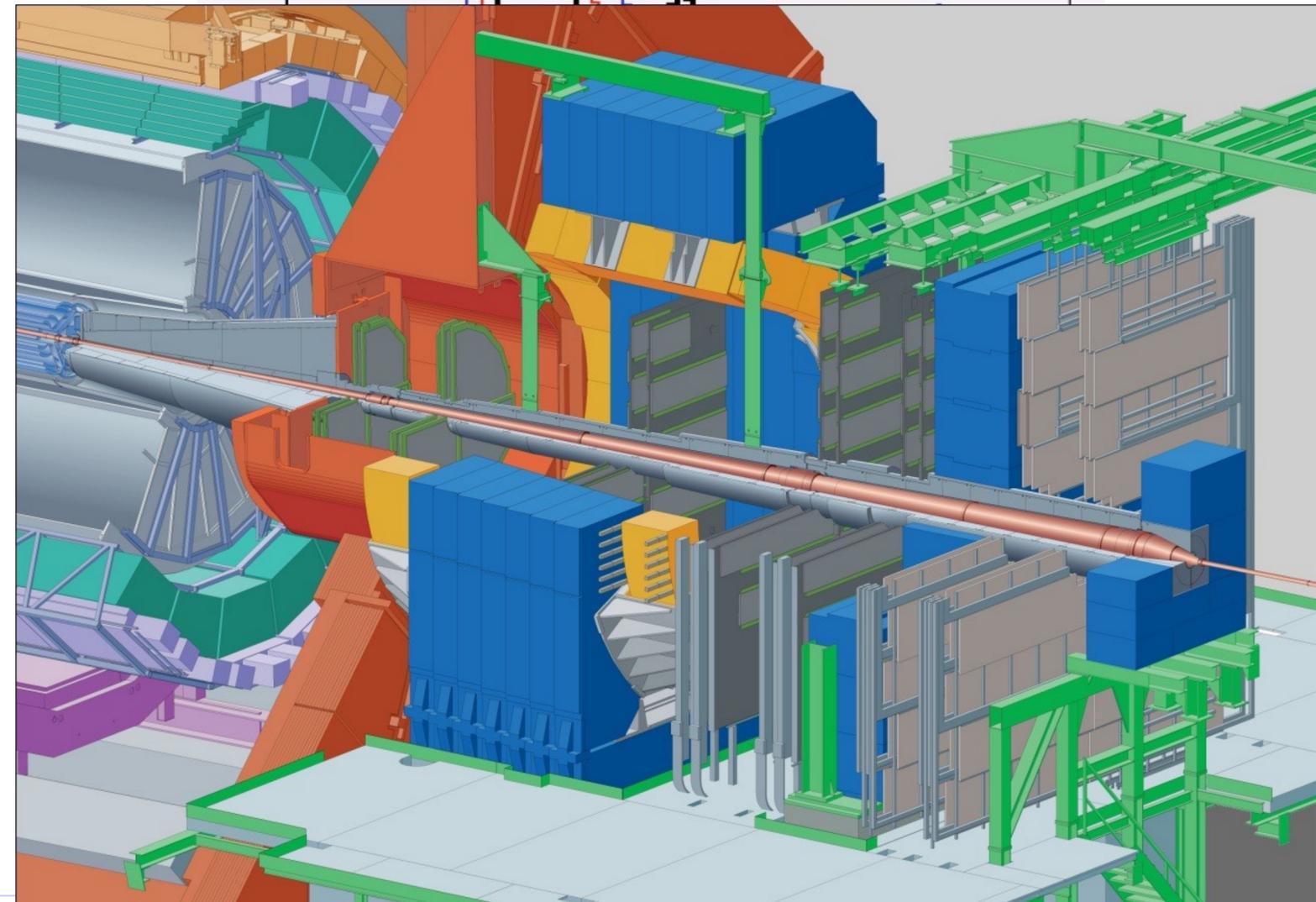
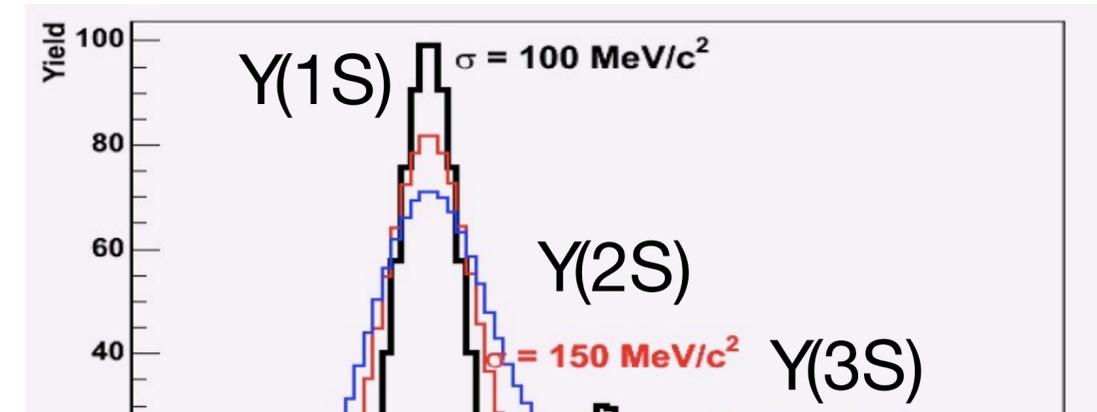
Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographique.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

→ ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :

- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B
- la composition de l'absorbeur frontal (et le budget de matière global du détecteur)
- la résolution intrinsèque des chambres de trajectographie



Caractéristiques du spectromètre à muons

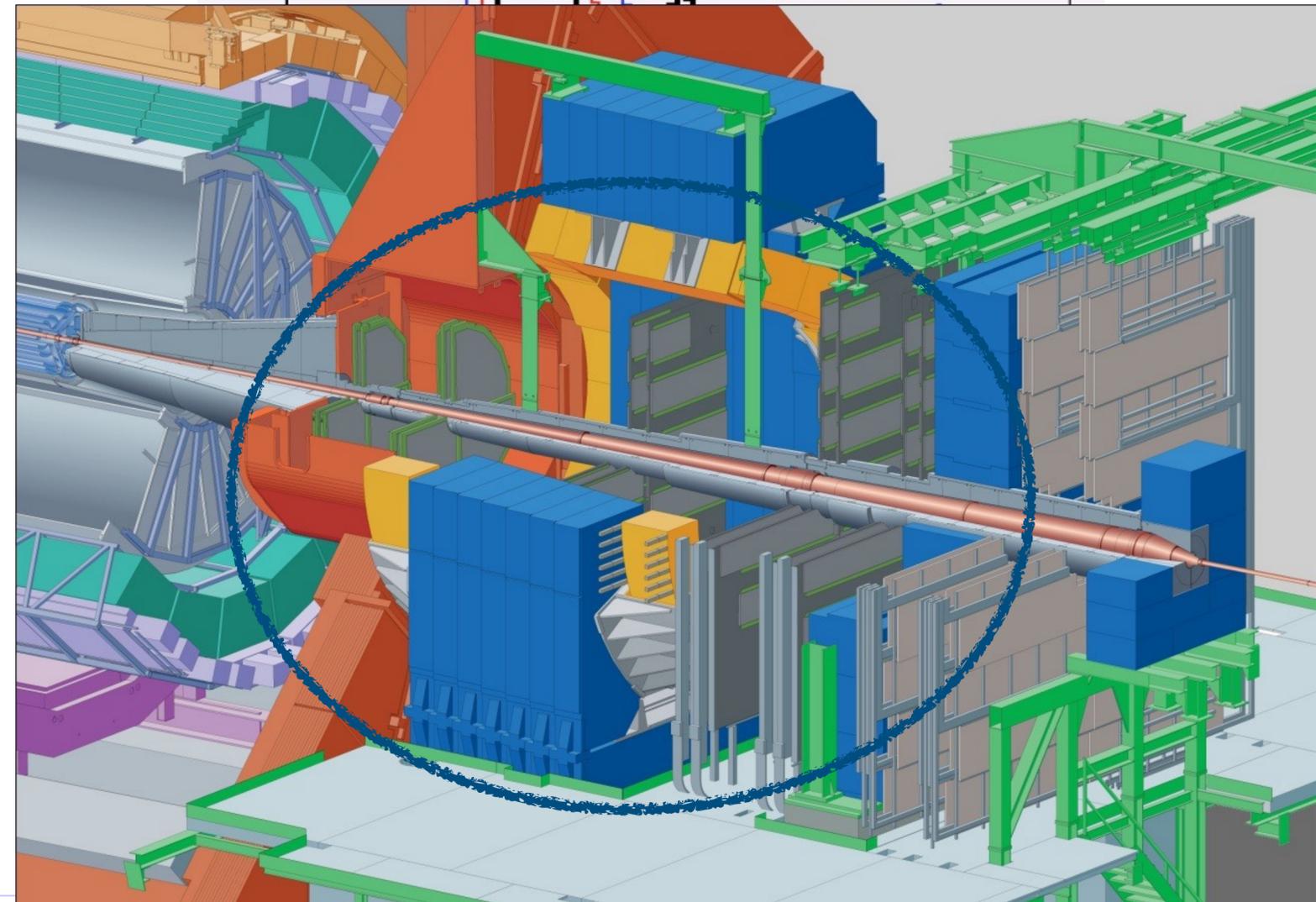
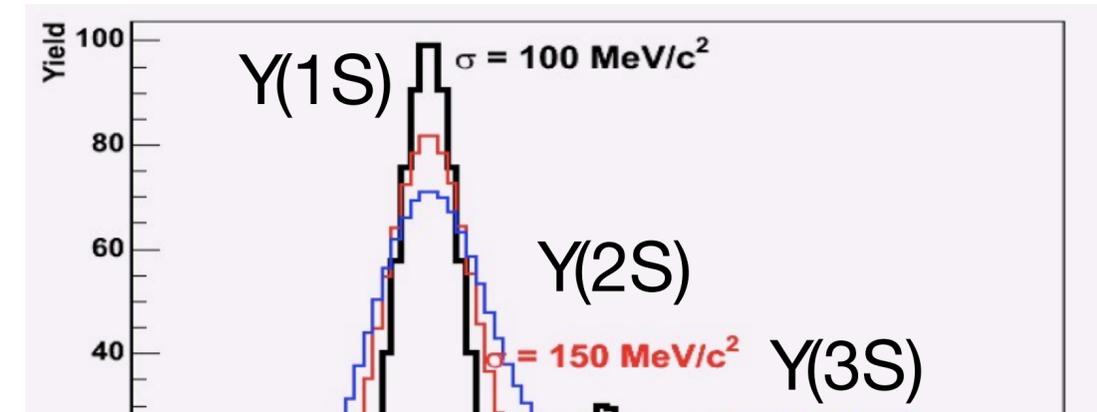
Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographie.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

→ ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :

- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B
- la composition de l'absorbeur frontal (et le budget de matière global du détecteur)
- la résolution intrinsèque des chambres de trajectographie



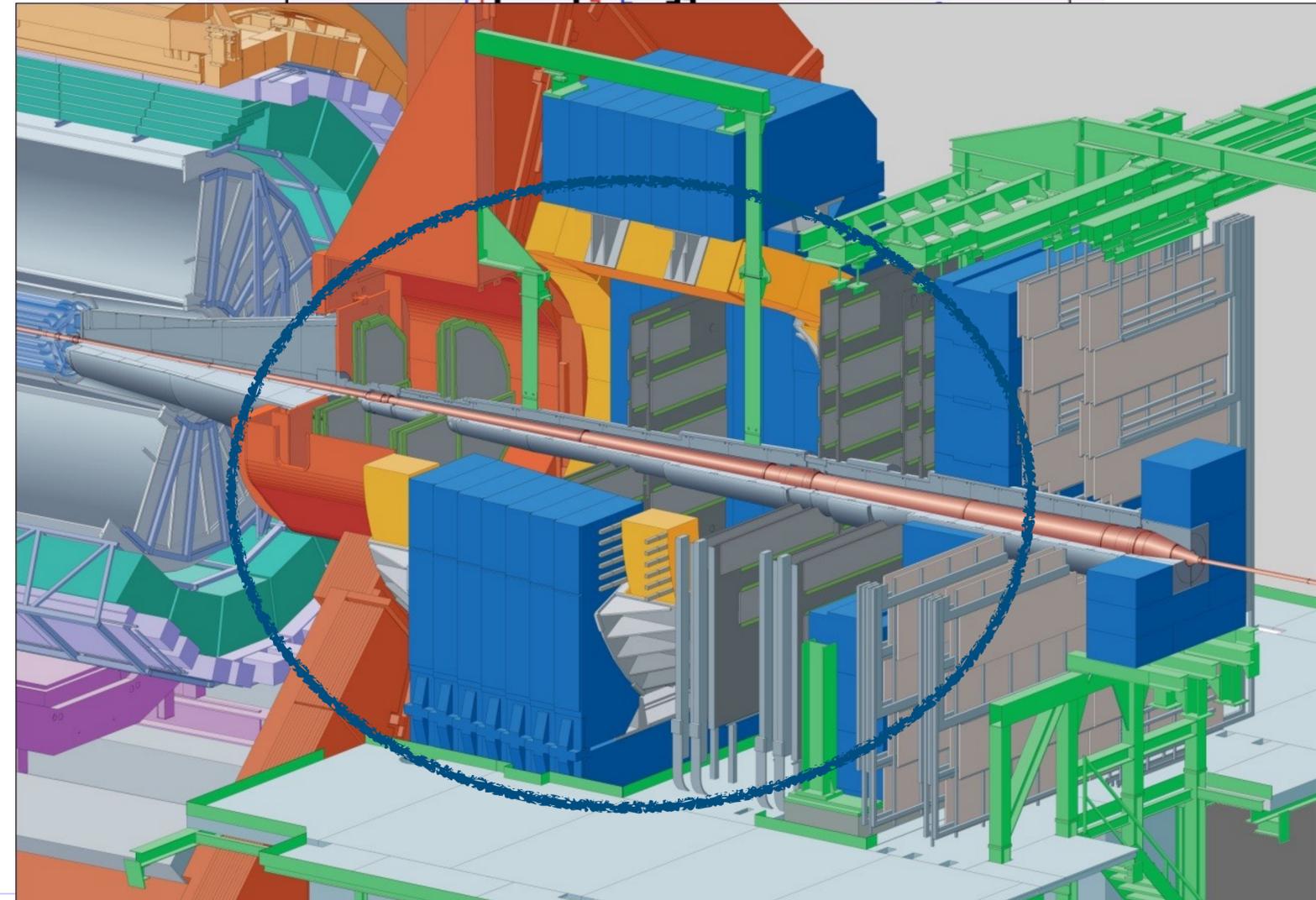
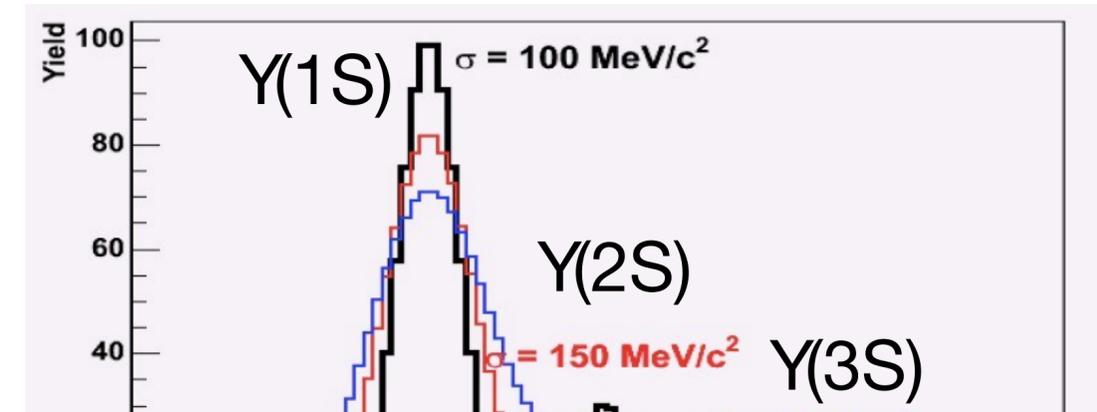
Caractéristiques du spectromètre à muons

Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographie.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

- ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :
- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B
 - la composition de l'absorbeur frontal (et le budget de matière global du détecteur)
 - la résolution intrinsèque des chambres de trajectographie
 - la connaissance précise du positionnement des détecteurs



Caractéristiques du spectromètre à muons

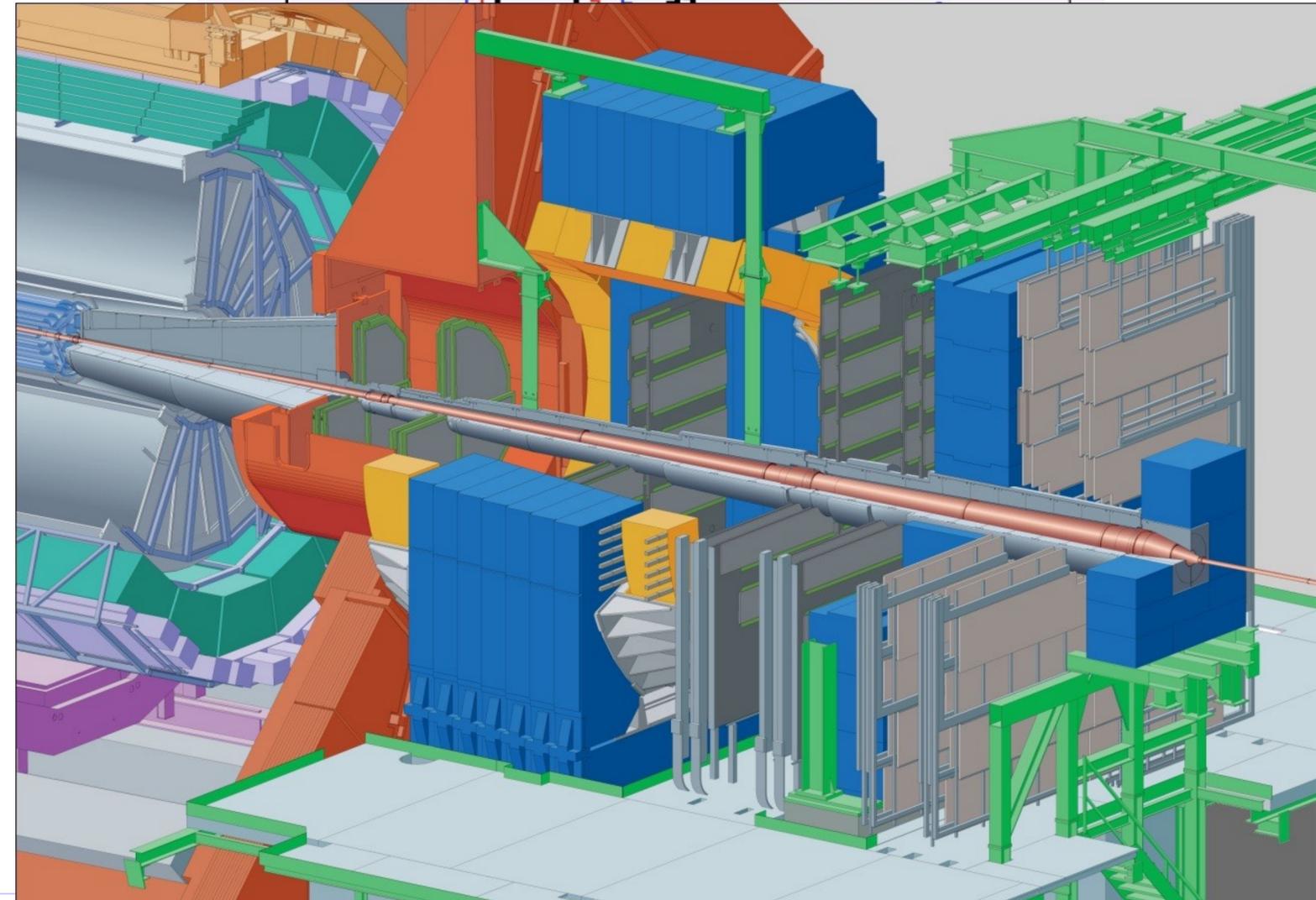
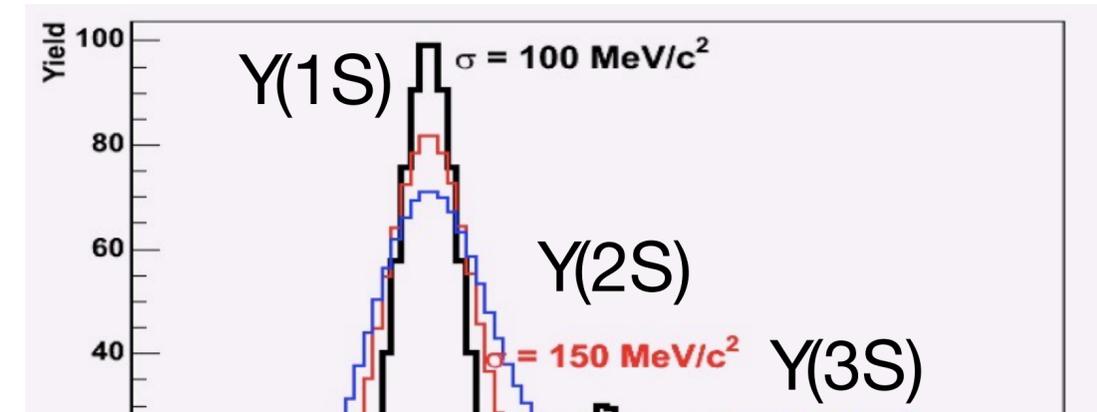
Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographie.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

→ ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :

- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B
- la composition de l'absorbeur frontal (et le budget de matière global du détecteur)
- la résolution intrinsèque des chambres de trajectographie
- la connaissance précise du positionnement des détecteurs
- la qualité de l'électronique de lecture des chambres



Caractéristiques du spectromètre à muons

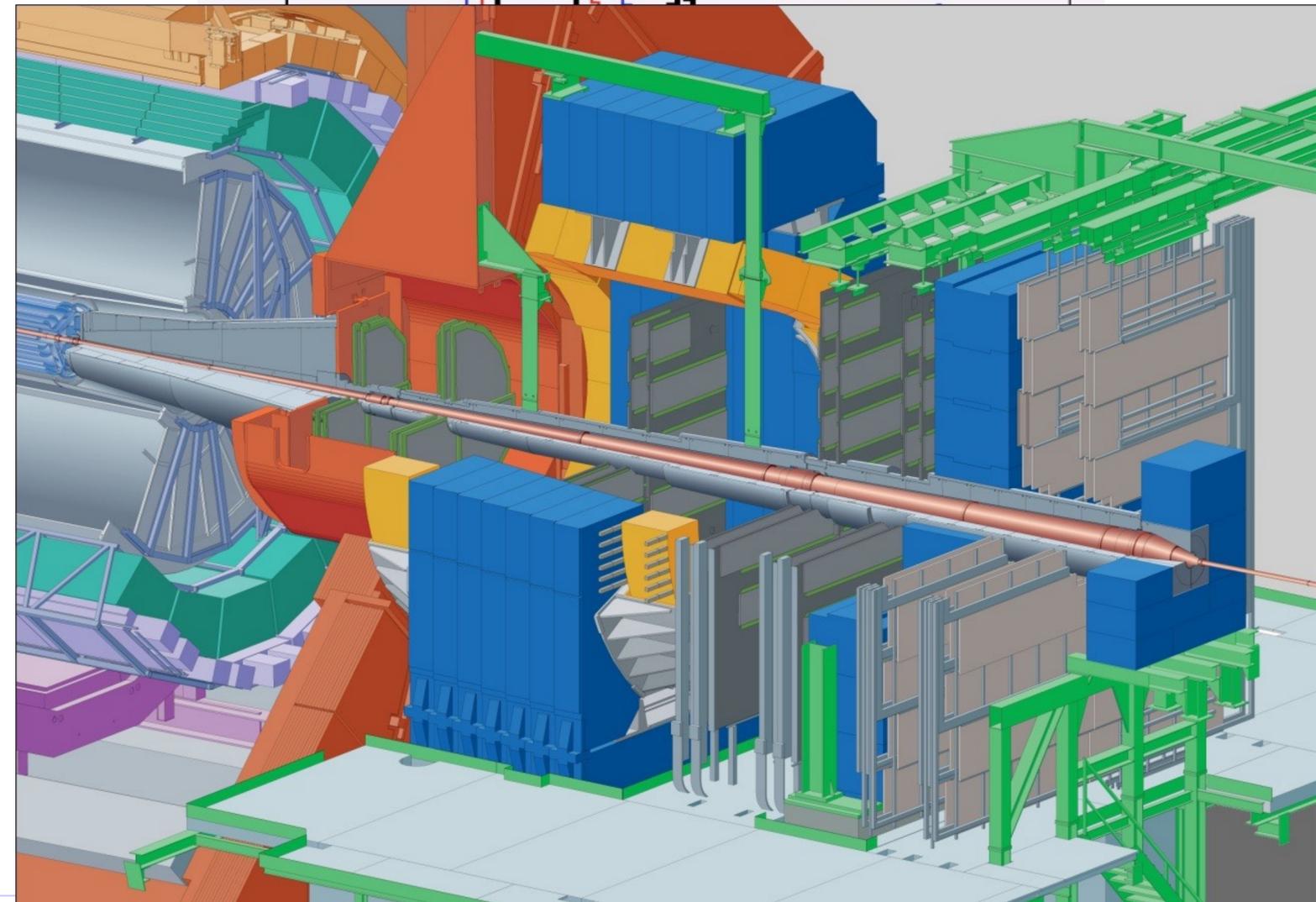
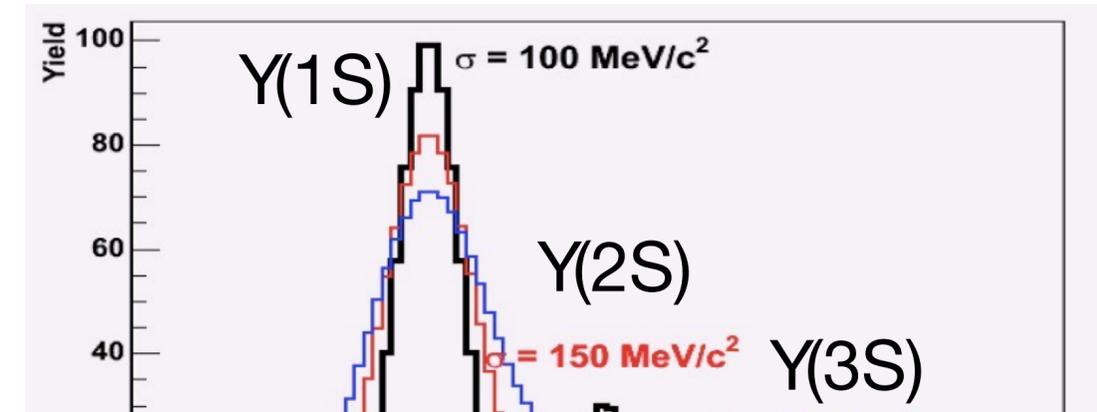
Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographie.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

→ ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :

- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B
- la composition de l'absorbeur frontal (et le budget de matière global du détecteur)
- la résolution intrinsèque des chambres de trajectographie
- la connaissance précise du positionnement des détecteurs
- la qualité de l'électronique de lecture des chambres
- le software de reconstruction avec la cartographie de l'électronique



Caractéristiques du spectromètre à muons

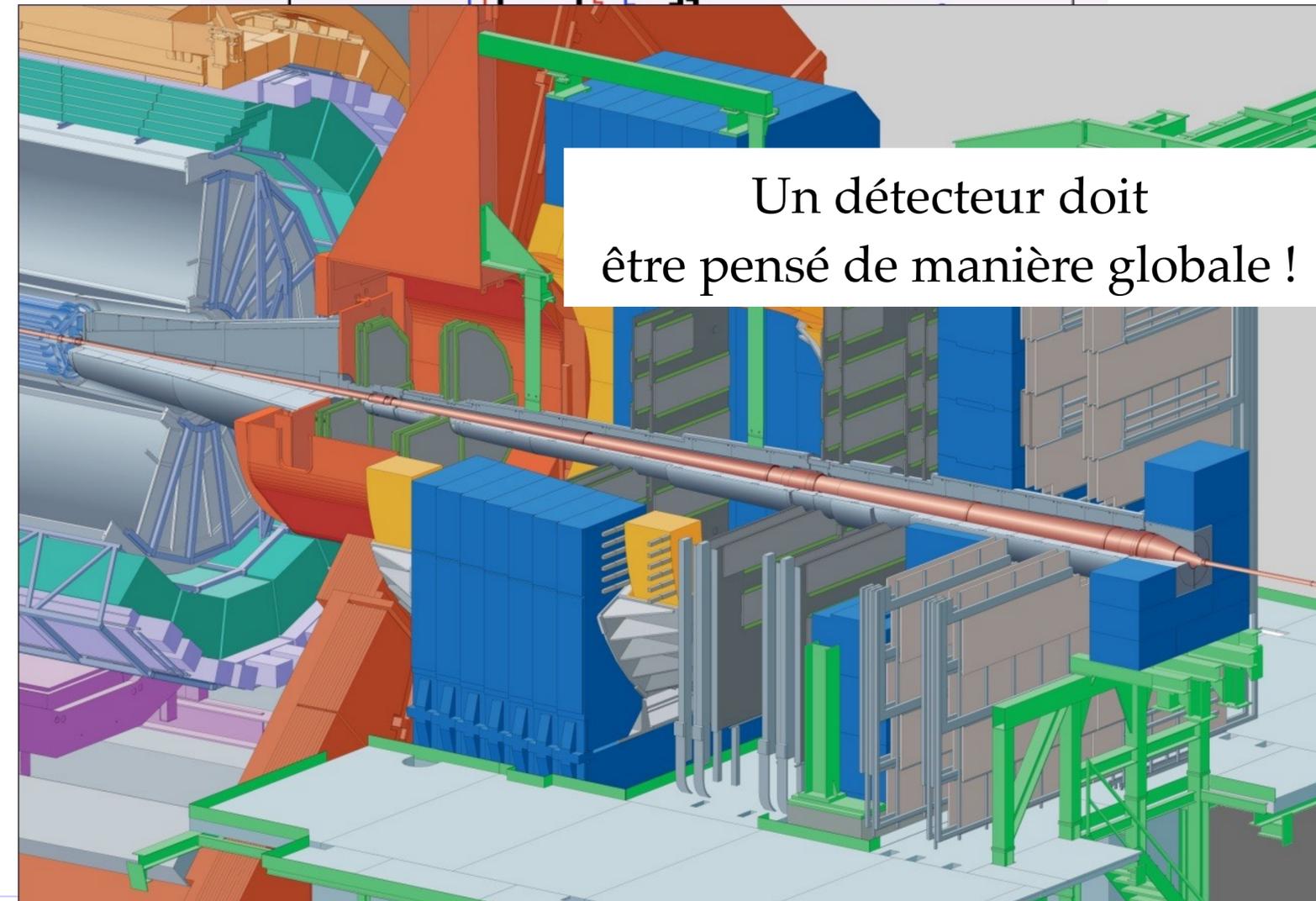
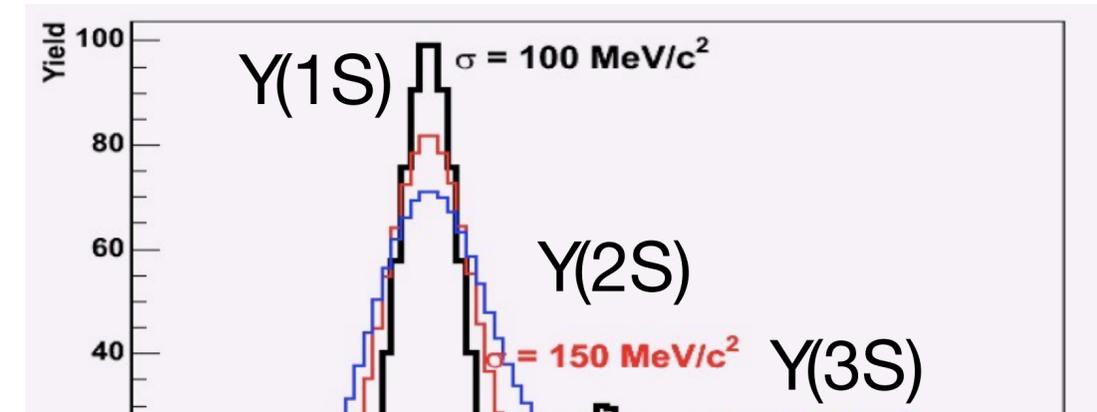
Pour simplifier, on se limitera ici uniquement à l'aspect trajectographie.

Objectif : obtenir une résolution en masse $M_{\mu\mu}$ de 100 MeV à la masse des $Y(nS)$

Qu'est-ce qui va jouer sur la résolution en masse ?

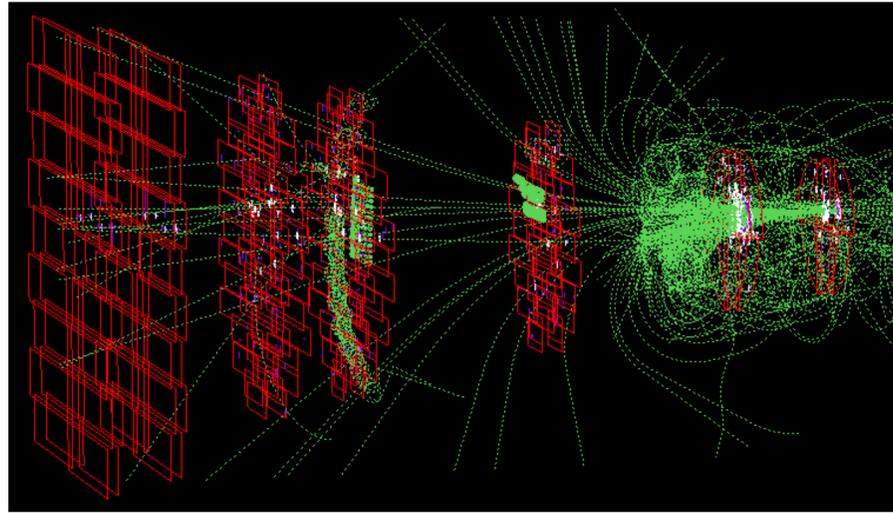
→ ce qui va affecter la mesure de l'impulsion des muons :

- la connaissance du champ magnétique → cartographie précise de B
- la composition de l'absorbeur frontal (et le budget de matière global du détecteur)
- la résolution intrinsèque des chambres de trajectographie
- la connaissance précise du positionnement des détecteurs
- la qualité de l'électronique de lecture des chambres
- le software de reconstruction avec la cartographie de l'électronique

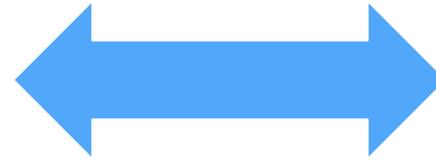


Un détecteur doit être pensé de manière globale !

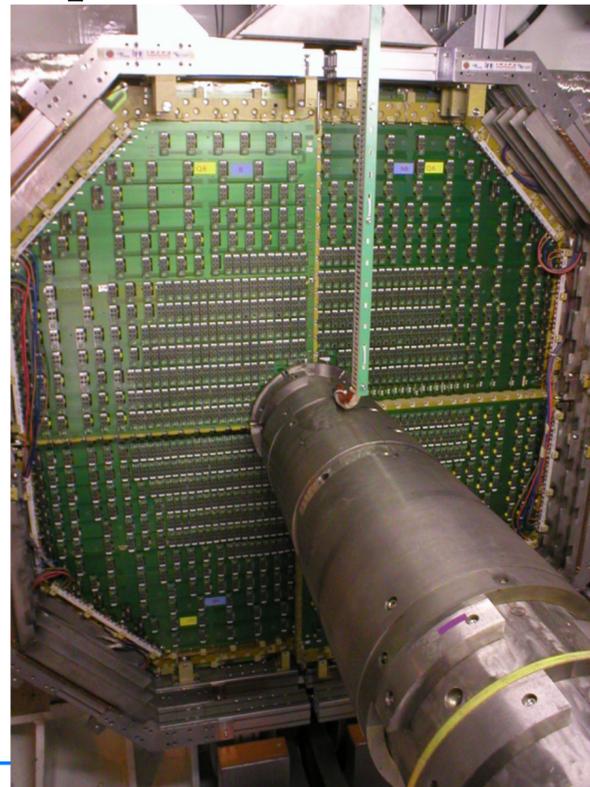
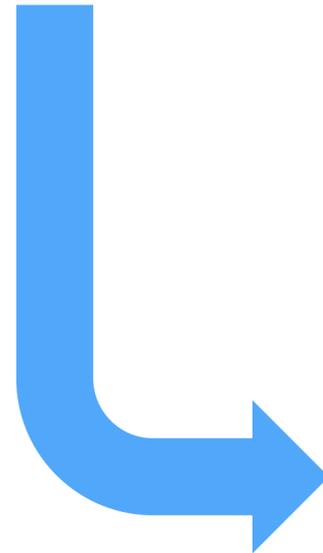
Dialogue permanent entre simulations et expérience



Modélisation des détecteurs →
définition des caractéristiques
et validation des options



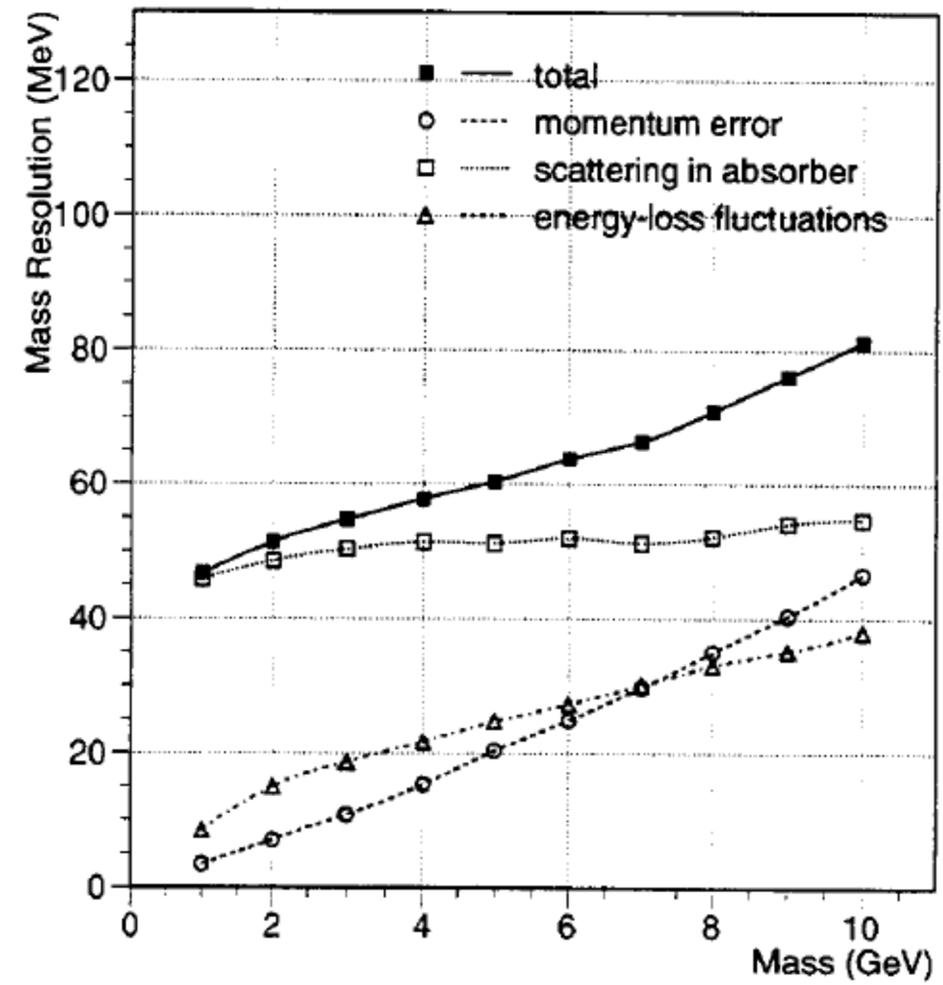
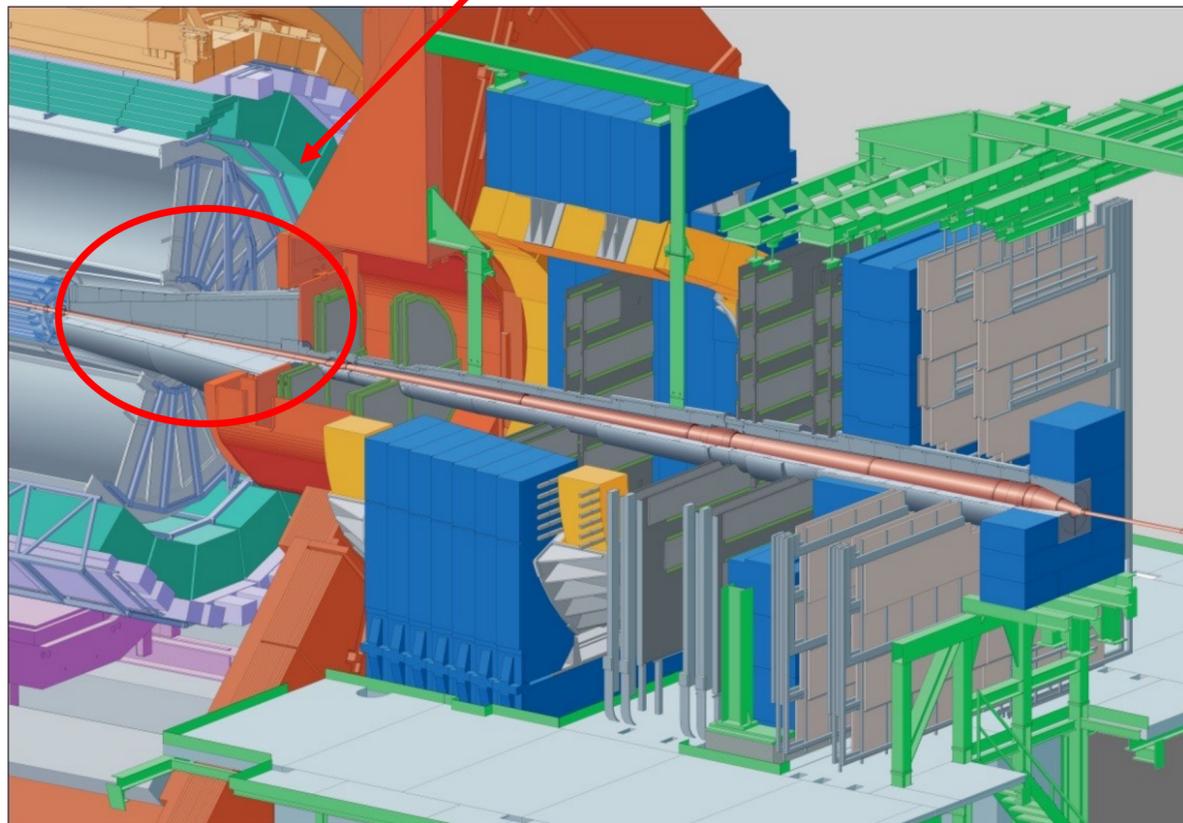
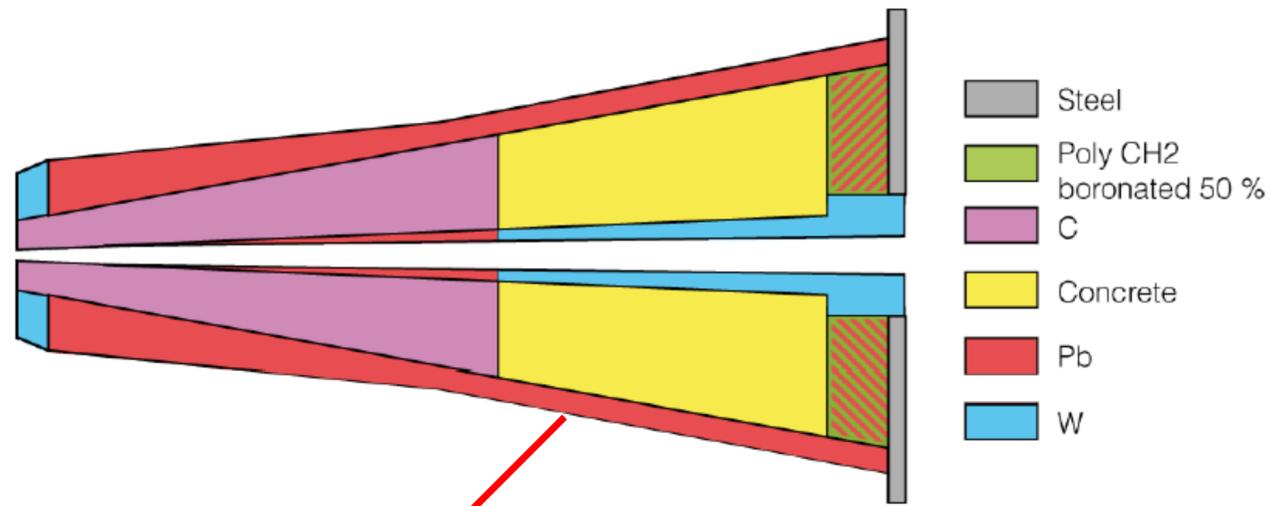
Validation et vérification des
performances par des tests
expérimentaux



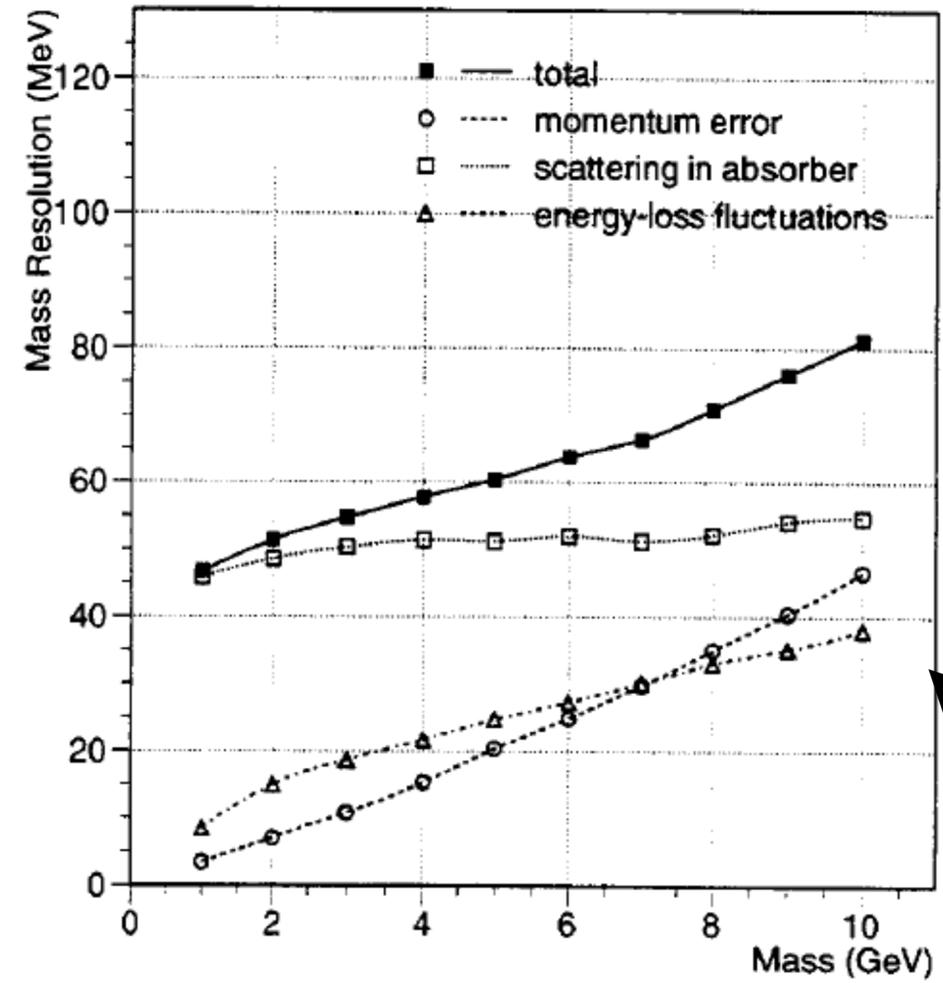
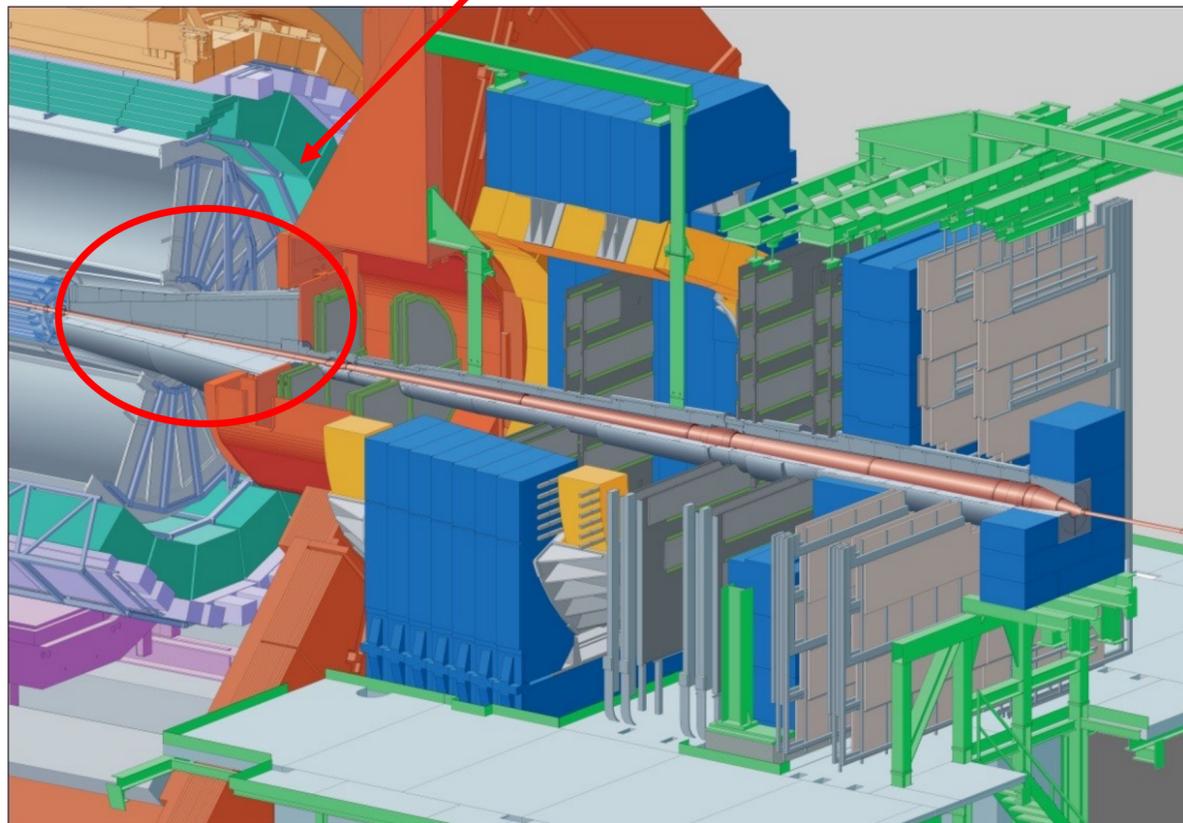
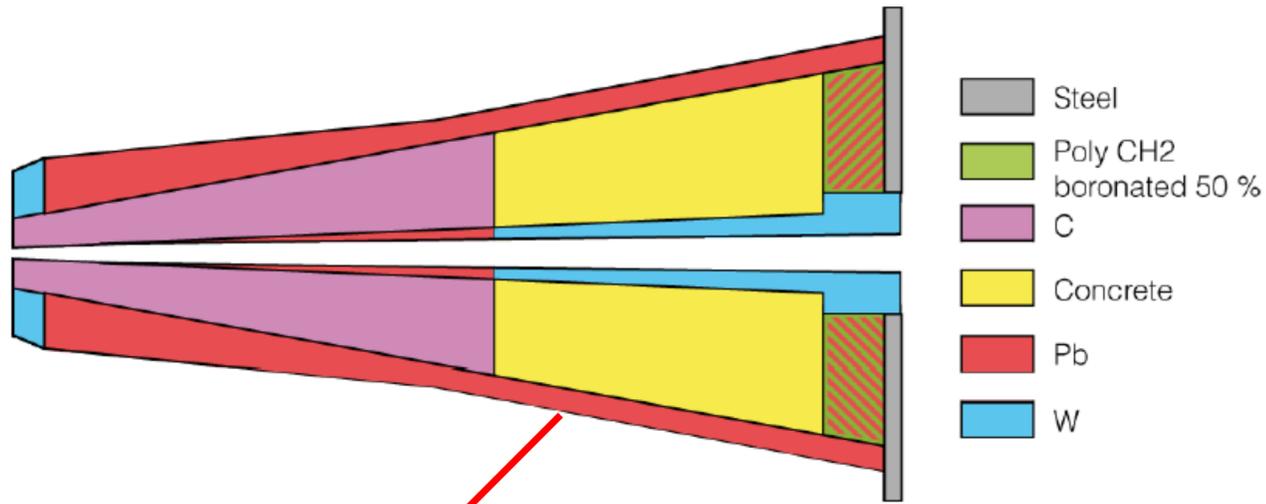
Construction et
installation du
détecteur



L'absorbeur frontal

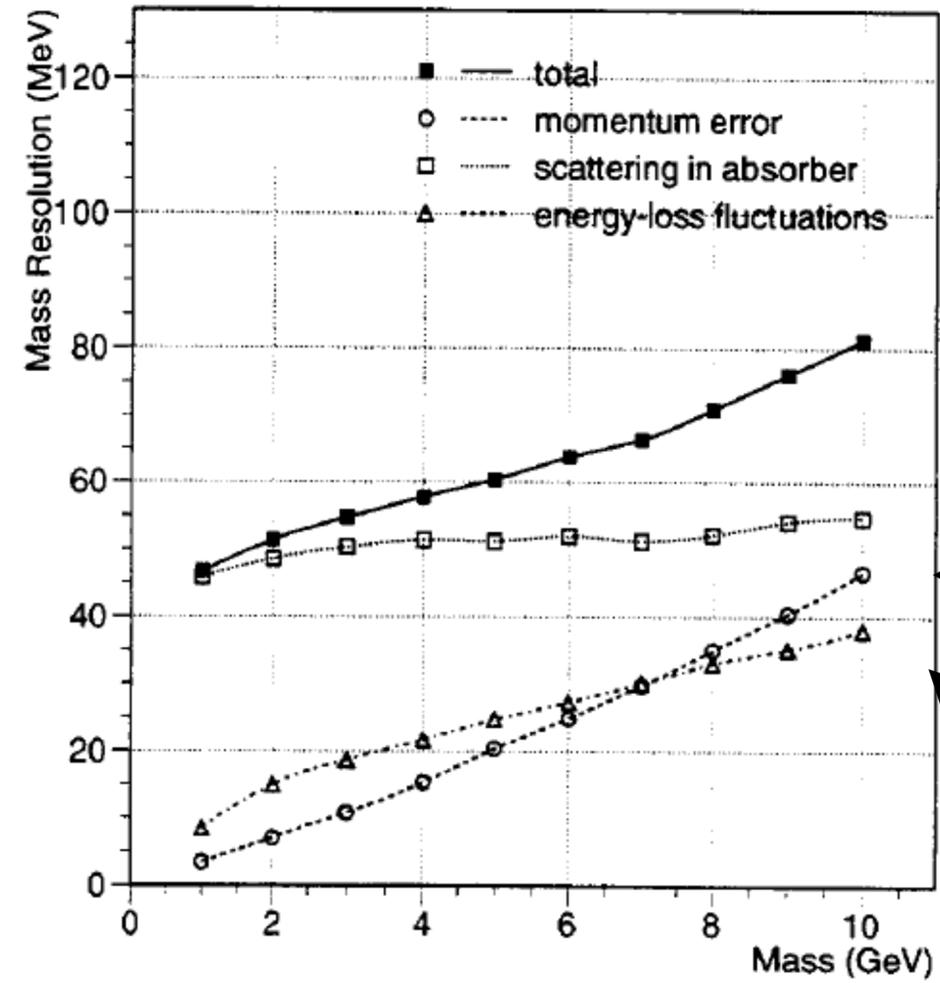
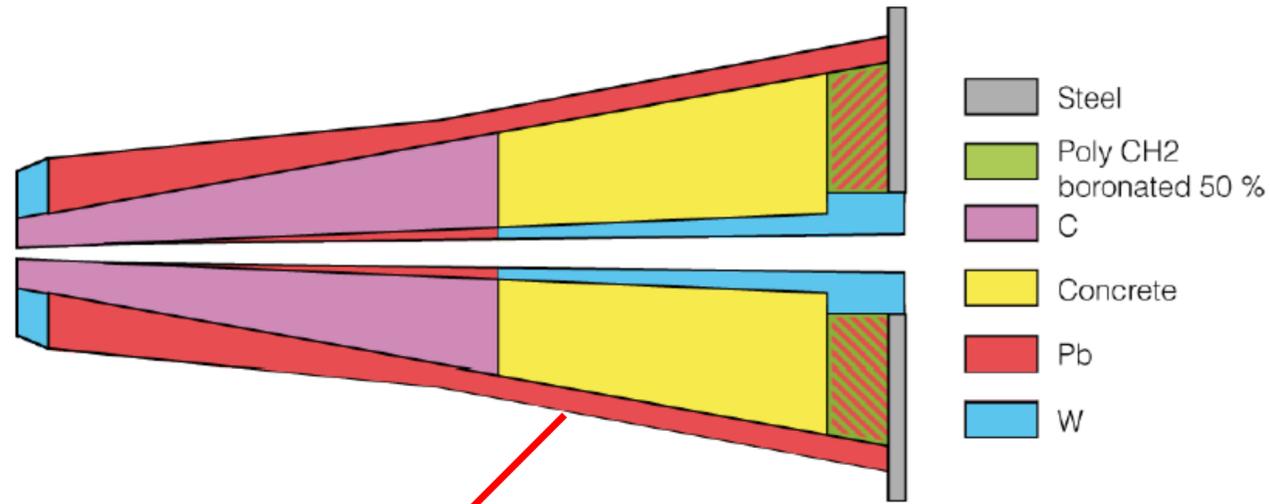


L'absorbeur frontal



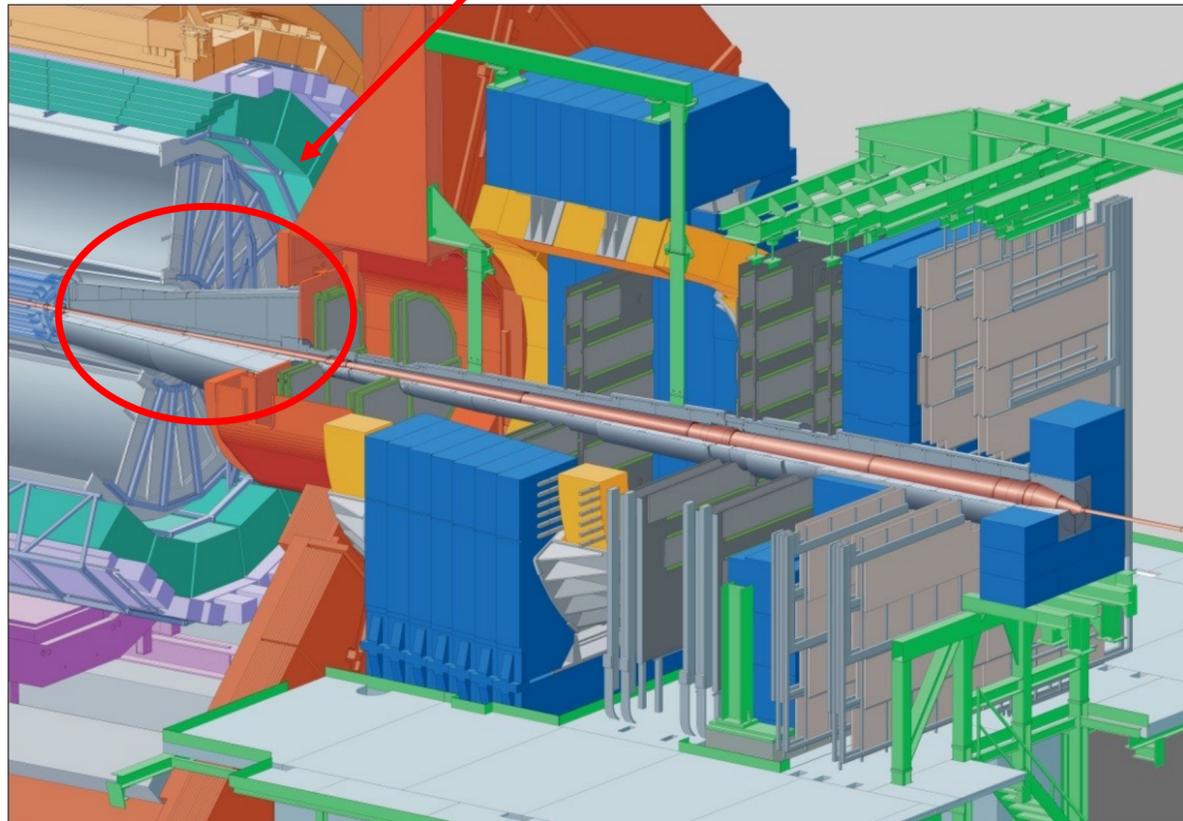
perte d'énergie dans l'absorbeur

L'absorbeur frontal

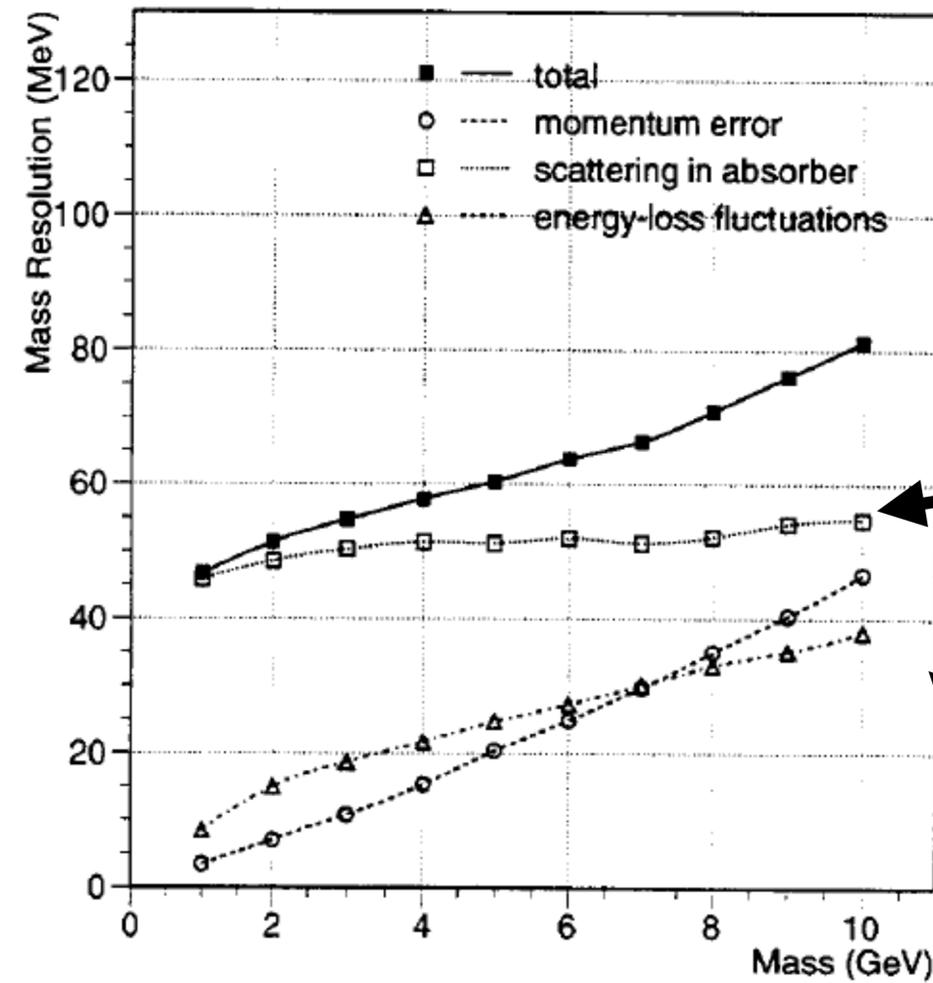
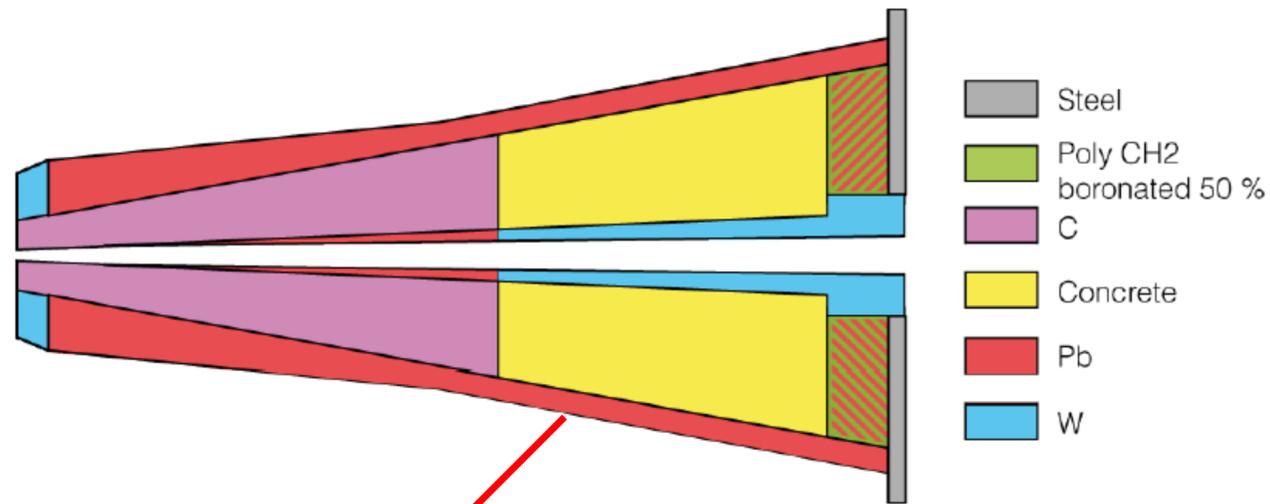


← resolution intrinsèque du trajectographie

← perte d'énergie dans l'**absorbeur**



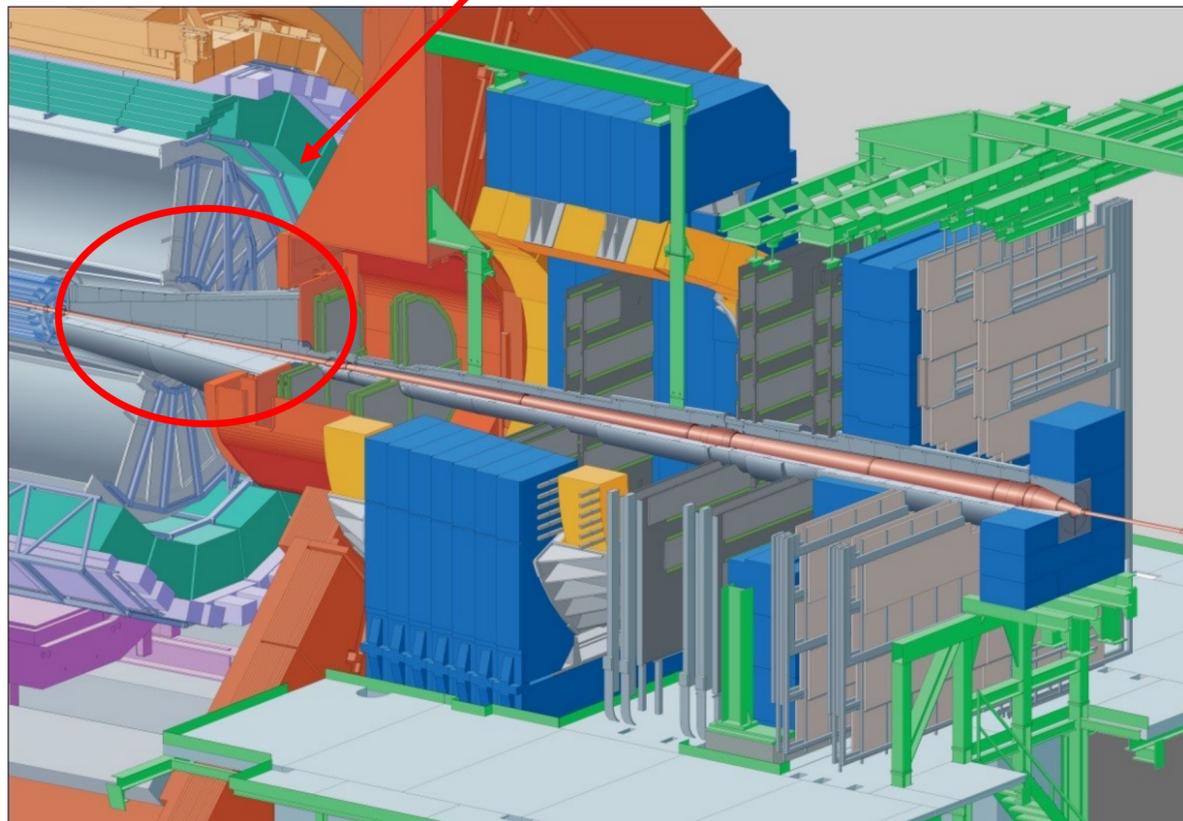
L'absorbeur frontal



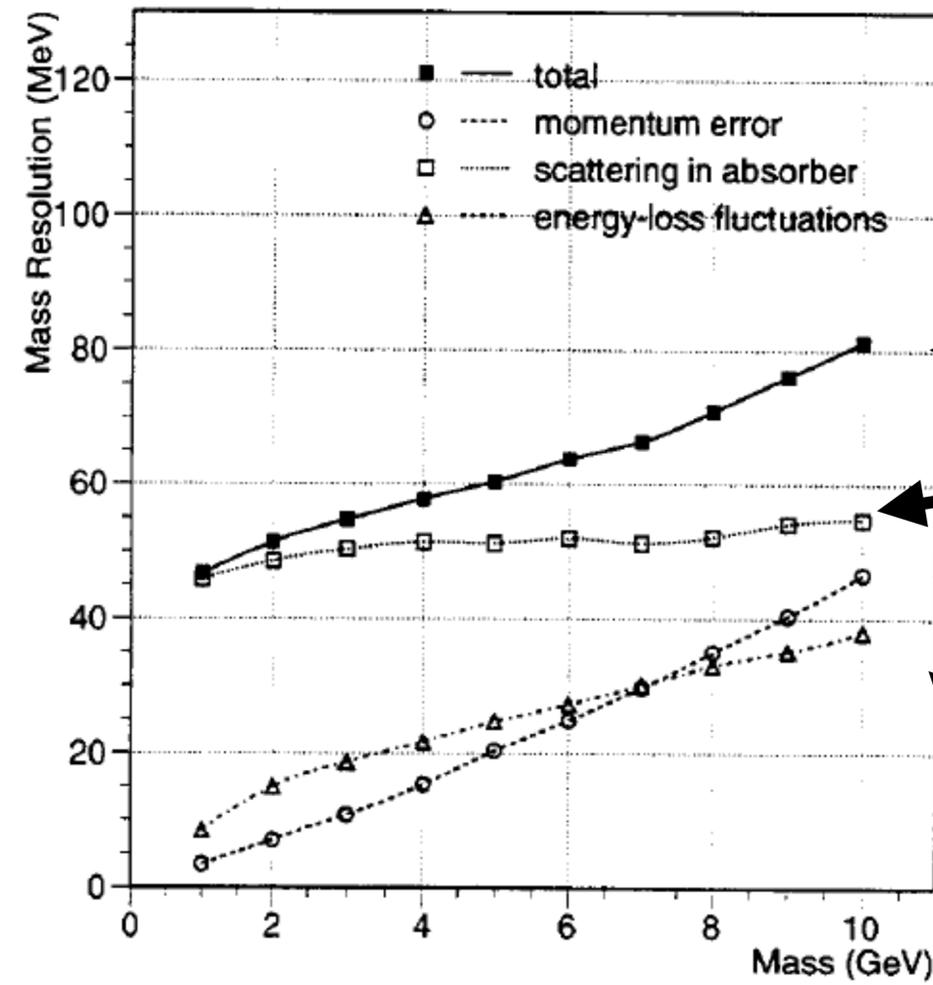
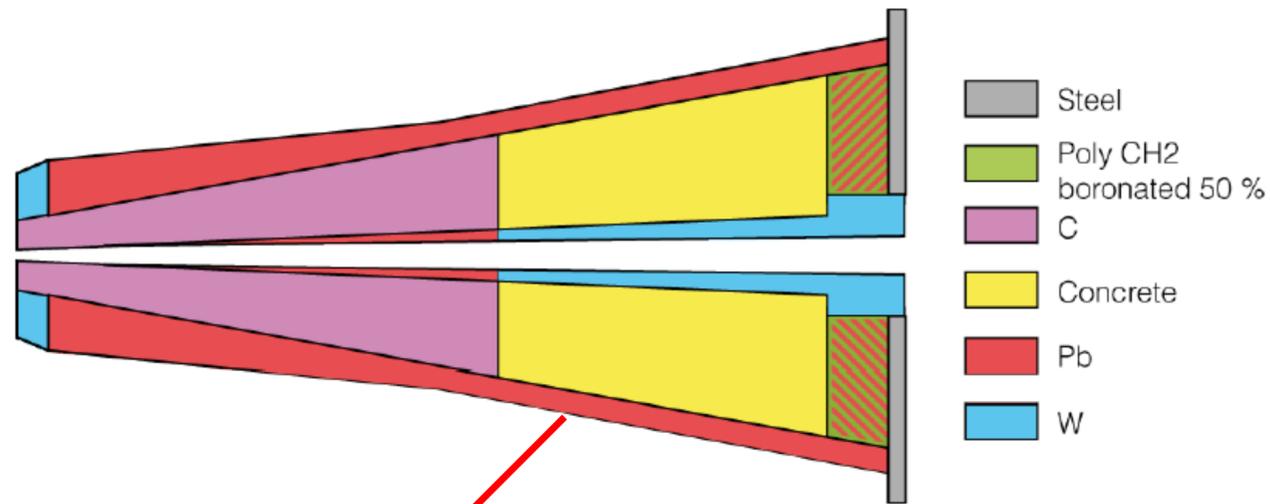
diffusion dans l'absorbeur

resolution intrinsèque du trajectographie

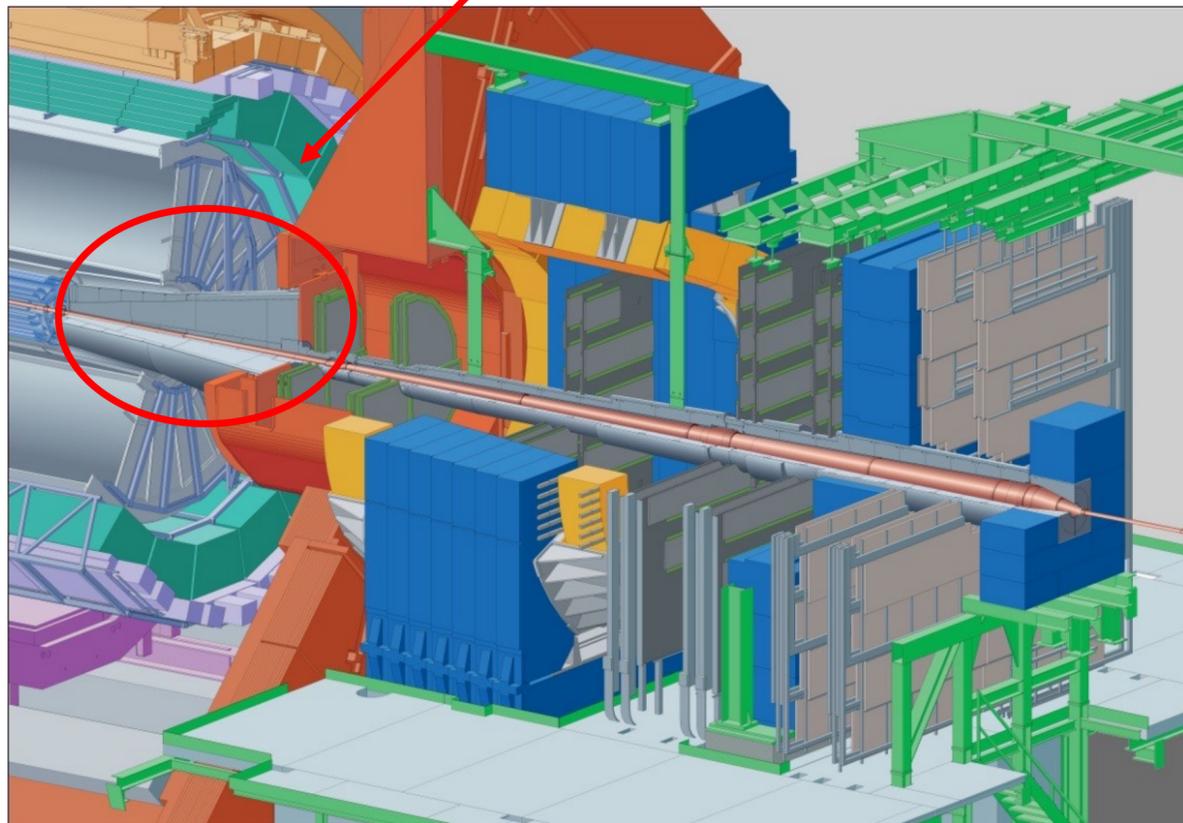
perte d'énergie dans l'absorbeur



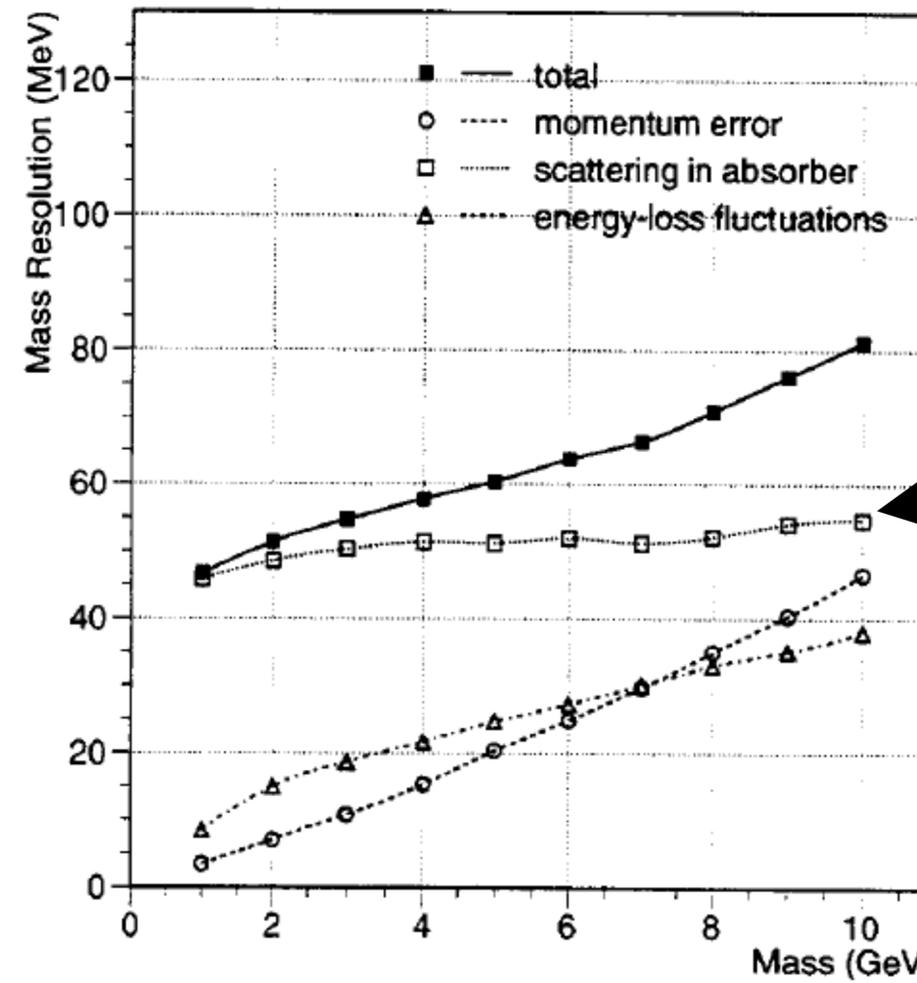
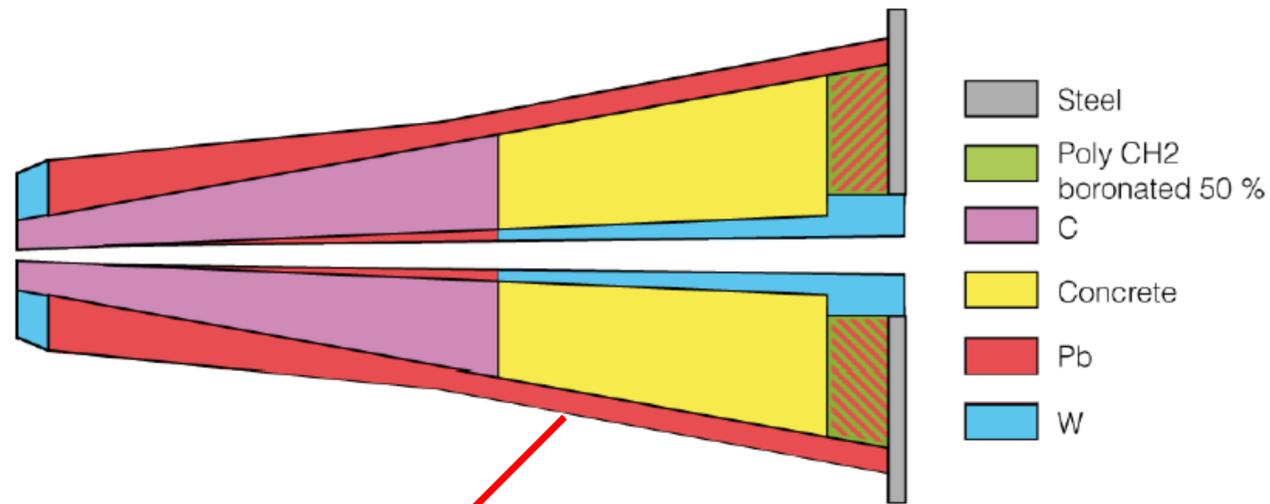
L'absorbeur frontal



← **total**
 ← diffusion dans l'**absorbeur**
 ← resolution intrinsèque du trajectographie
 ← perte d'énergie dans l'**absorbeur**



L'absorbeur frontal

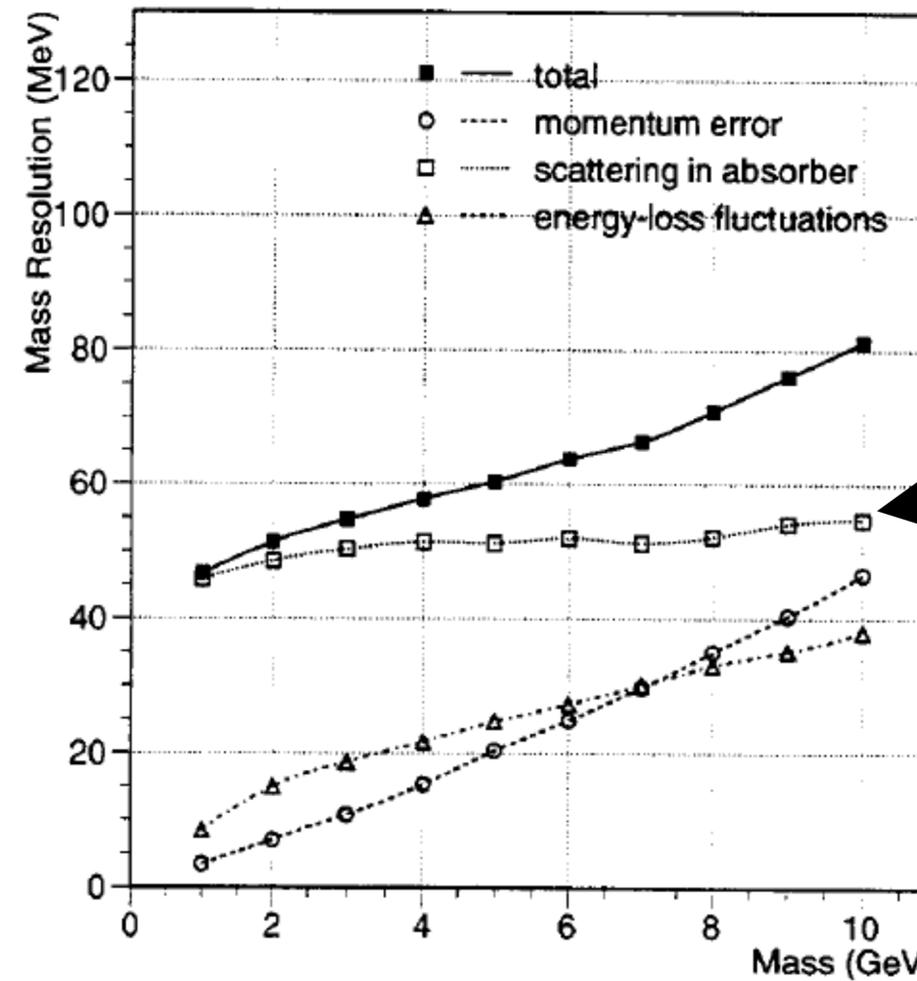
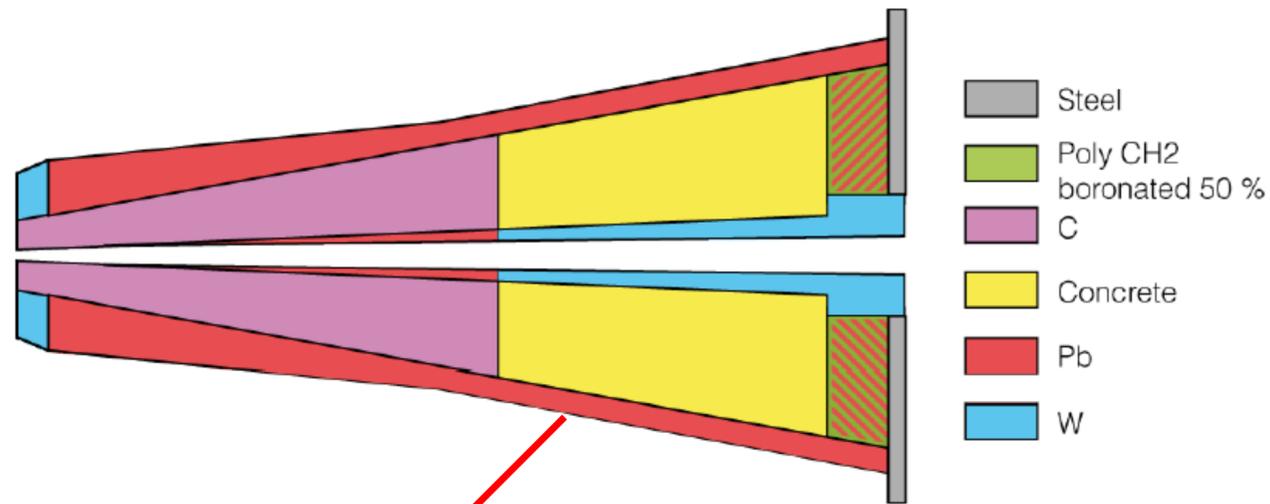


← **total**
 ← diffusion dans l'**absorbeur**
 ← resolution intrinsèque du trajectographie
 ← perte d'énergie dans l'**absorbeur**

Contraintes : réduire le flux hadronique en dégradant le moins possible la résolution en masse → $\sim 10 \lambda_I$ et $\sim 60 X_0$

Estimation : jusqu'à 8000 particules chargées par unité de y

L'absorbeur frontal



← **total**
 ← diffusion dans l'**absorbeur**
 ← résolution intrinsèque du trajectographie
 ← perte d'énergie dans l'**absorbeur**

Contraintes : réduire le flux hadronique en dégradant le moins possible la résolution en masse → $\sim 10 \lambda_I$ et $\sim 60 X_0$

Estimation : jusqu'à 8000 particules chargées par unité de y

Mesure : 2000 particules chargées par unité de y ...

→ absorbeur frontal surdimensionné !

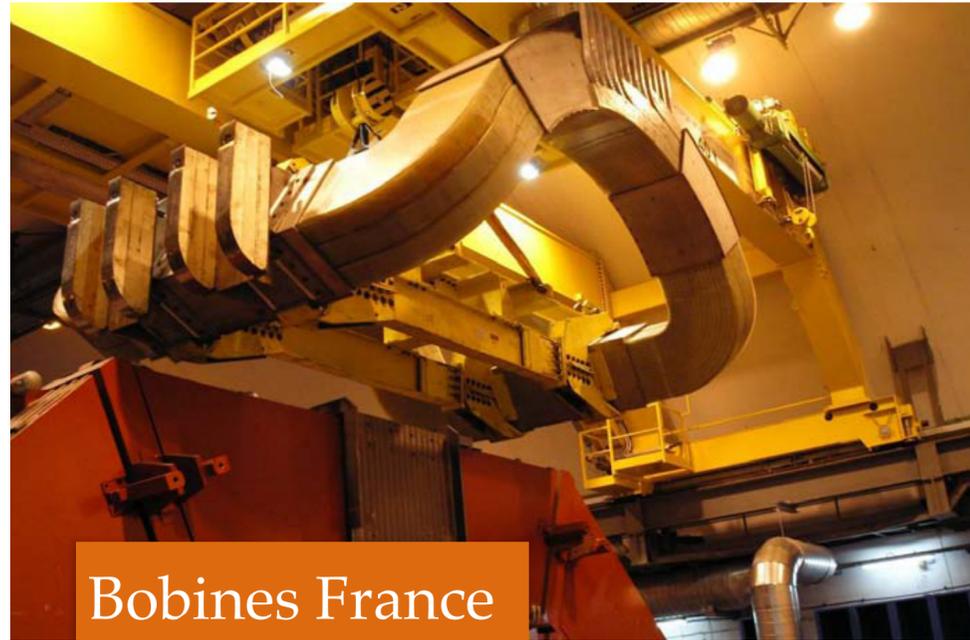
Absorbeur frontal



Installation de l'absorbeur frontal
de hadrons (~30 t)
Structure interne complexe



Aimant dipolaire

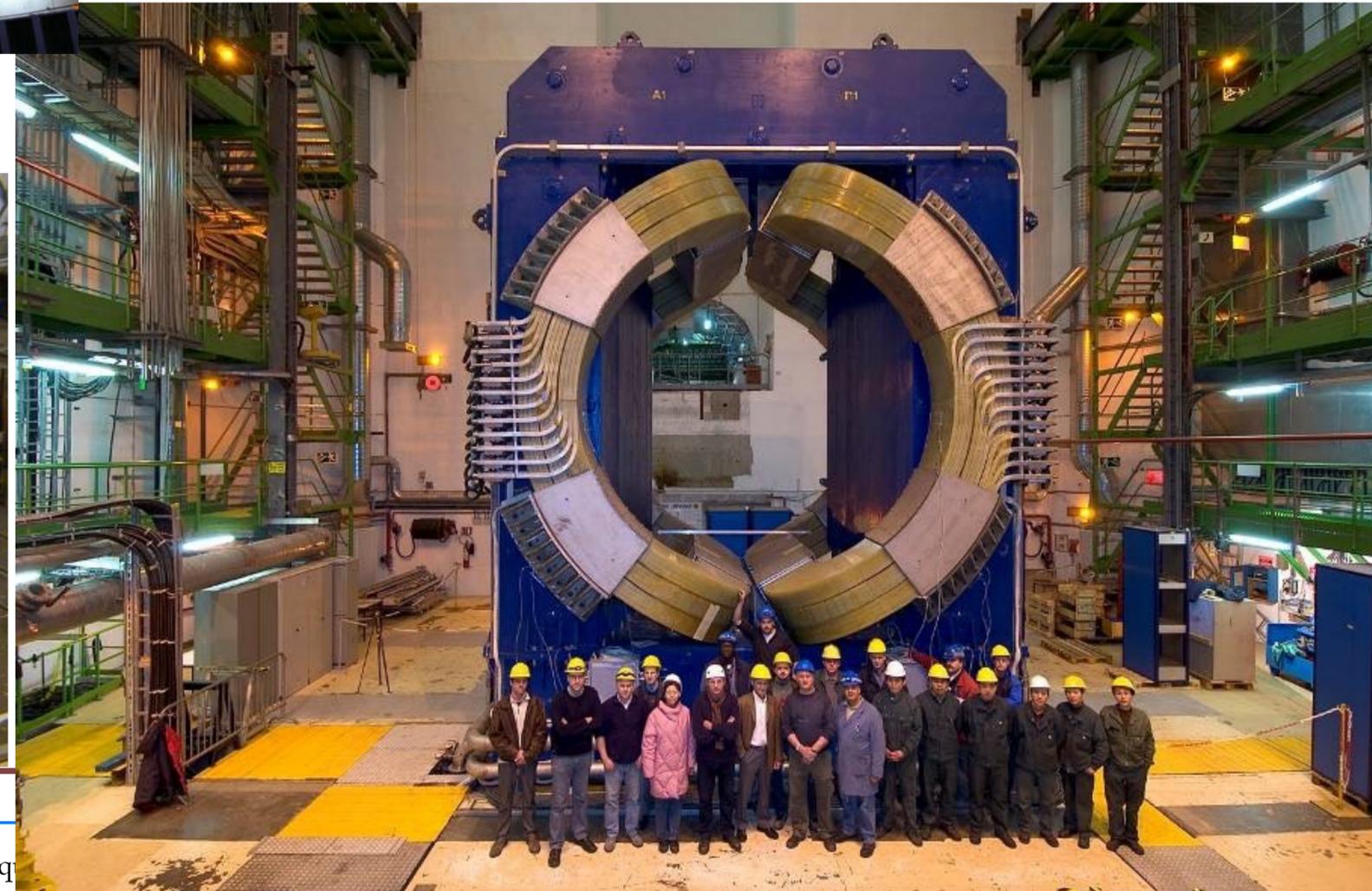


Bobines France

0.7 T - 2.7 MW - 800 t



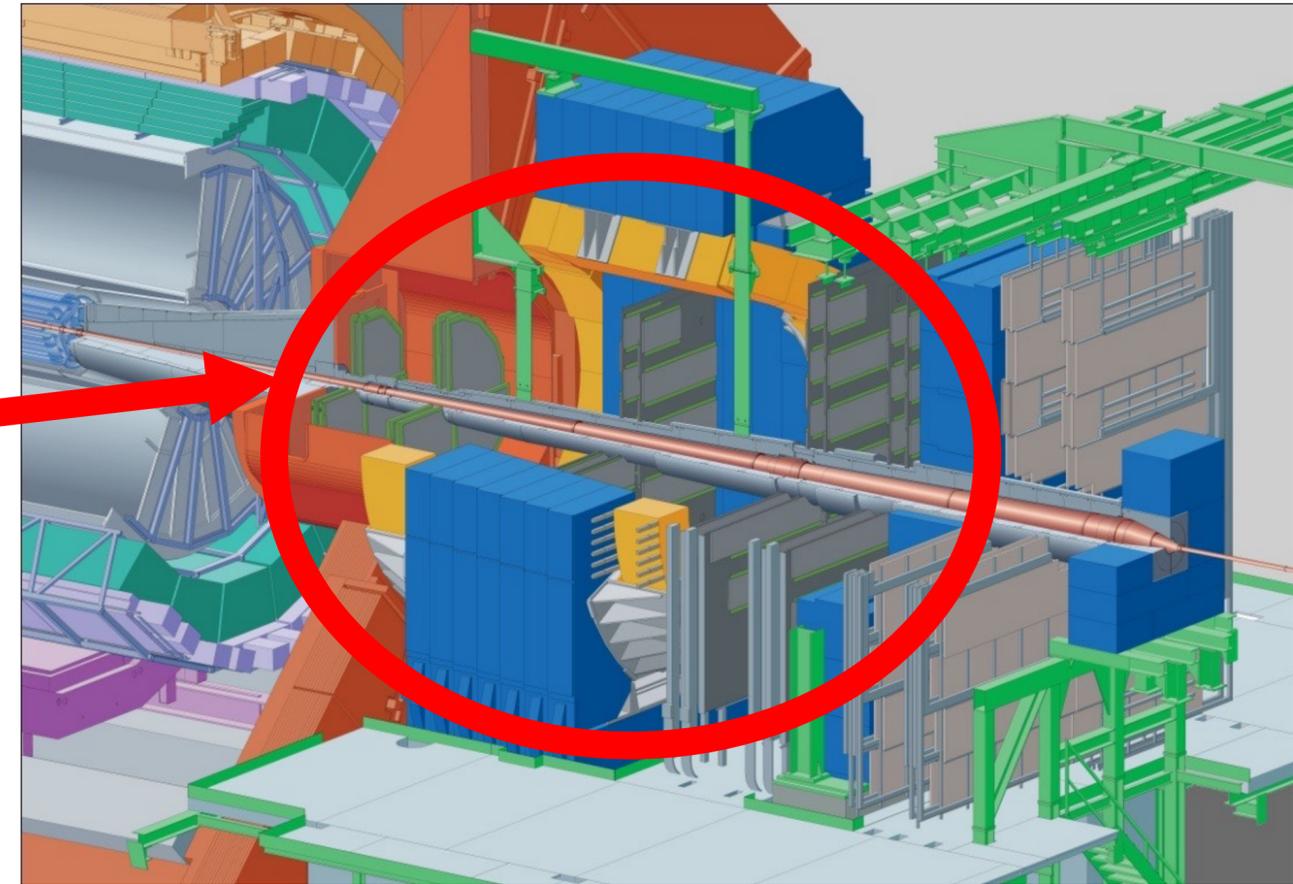
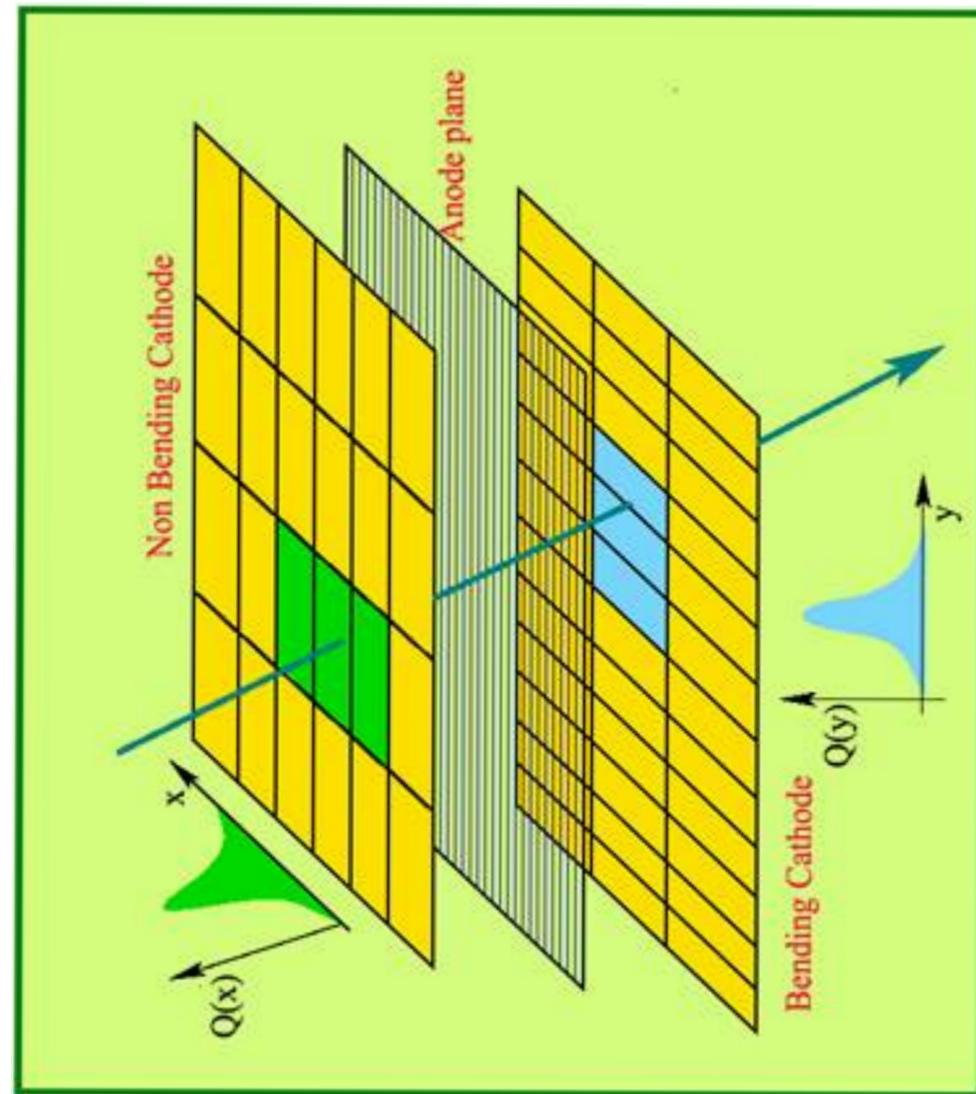
Culasse Dubna



Les chambres de trajectographie

Chambre à fil à cathodes segmentées

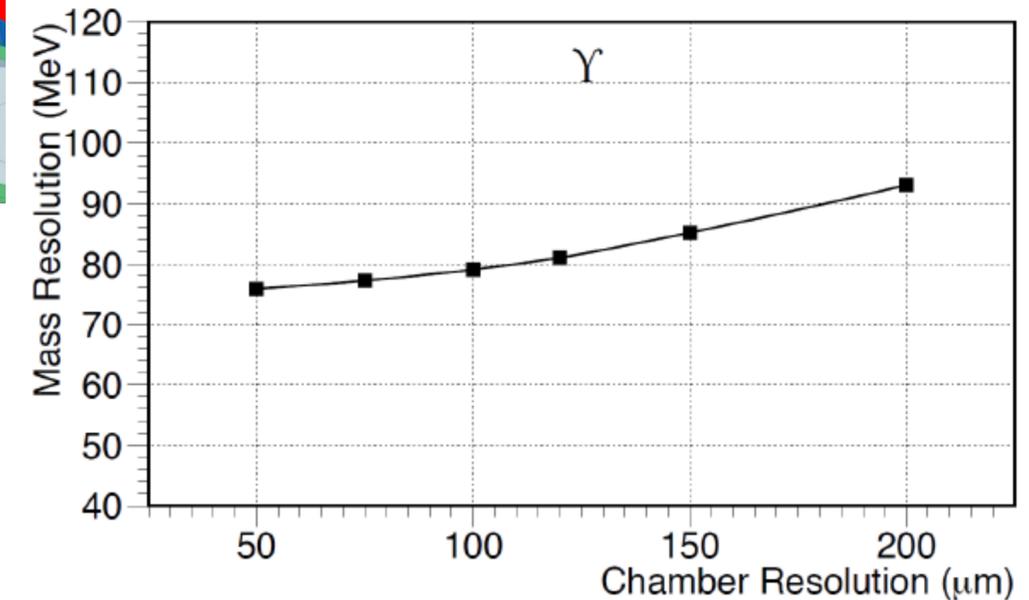
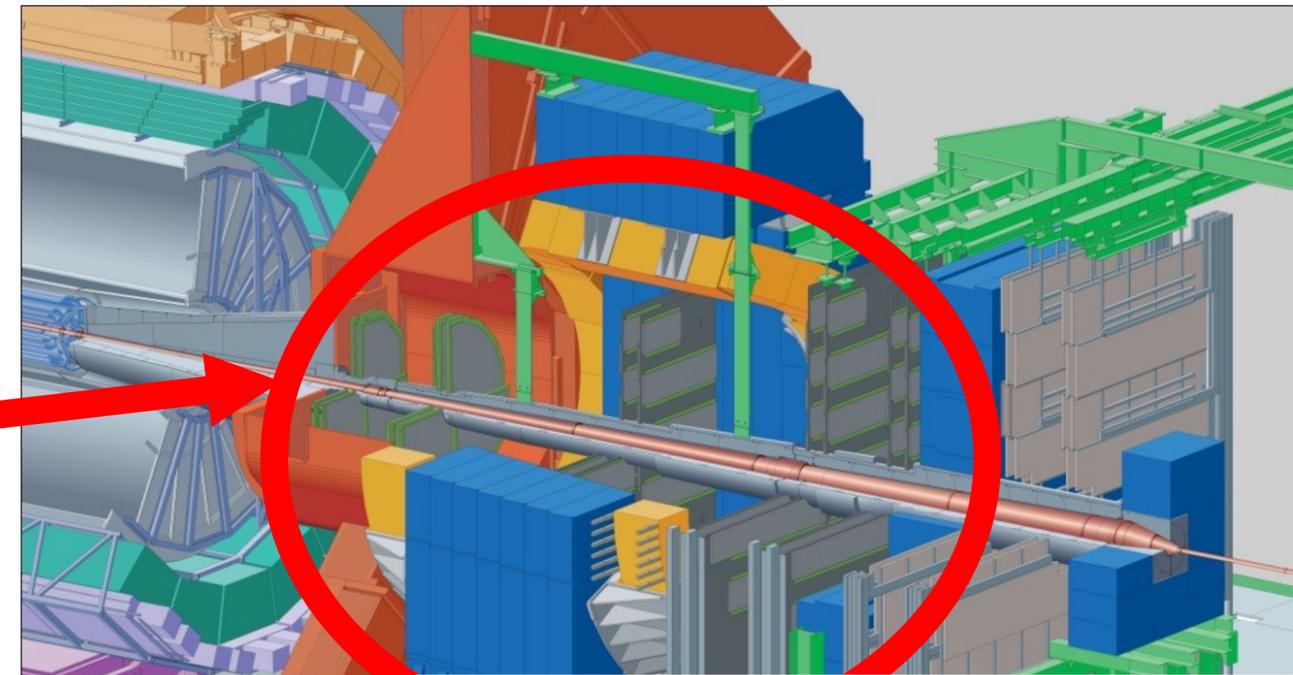
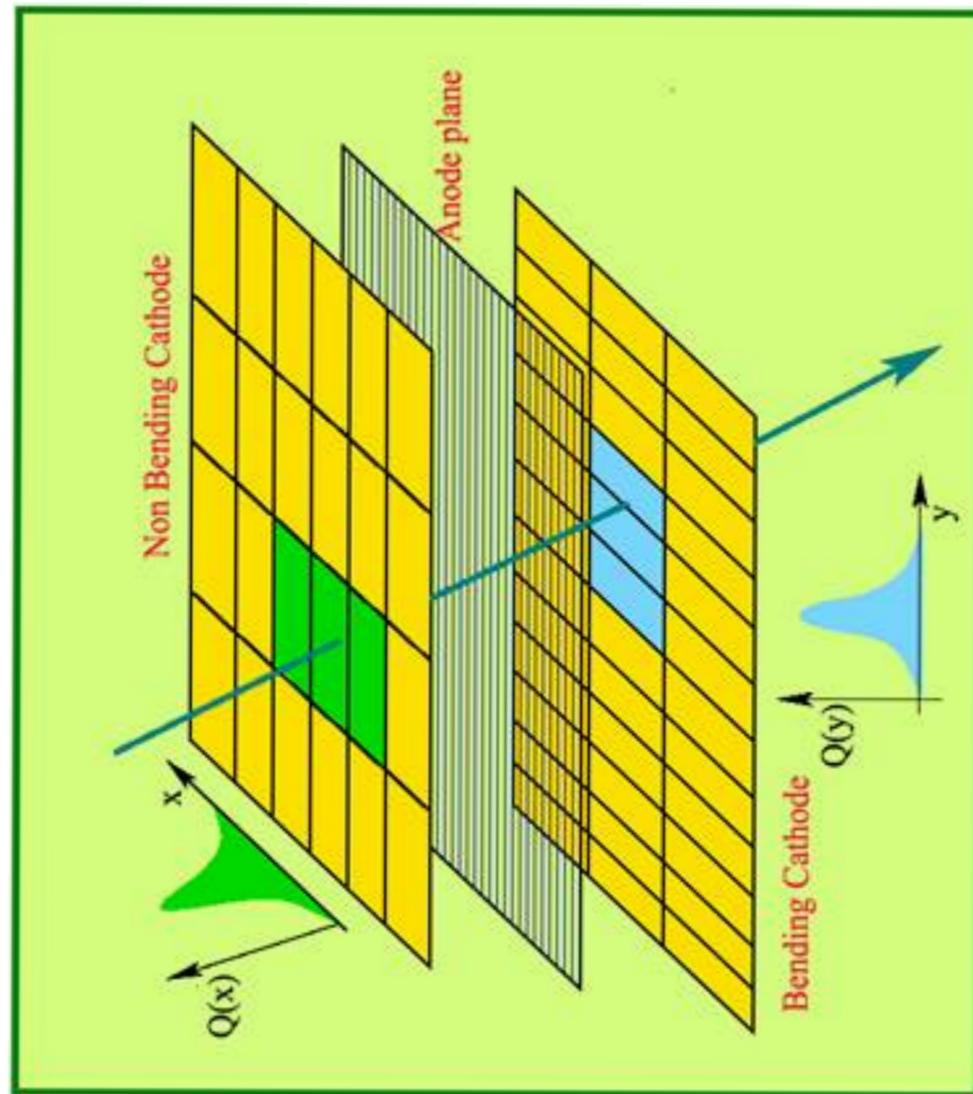
- Gaz: Ar (80%) / CO₂(20%)
- Plan d'anode : plan de fils à 1650 V
- Plan de cathode: mince couche d'or



Les chambres de trajectographie

Chambre à fil à cathodes segmentées

- Gaz: Ar (80%) / CO₂(20%)
- Plan d'anode : plan de fils à 1650 V
- Plan de cathode: mince couche d'or

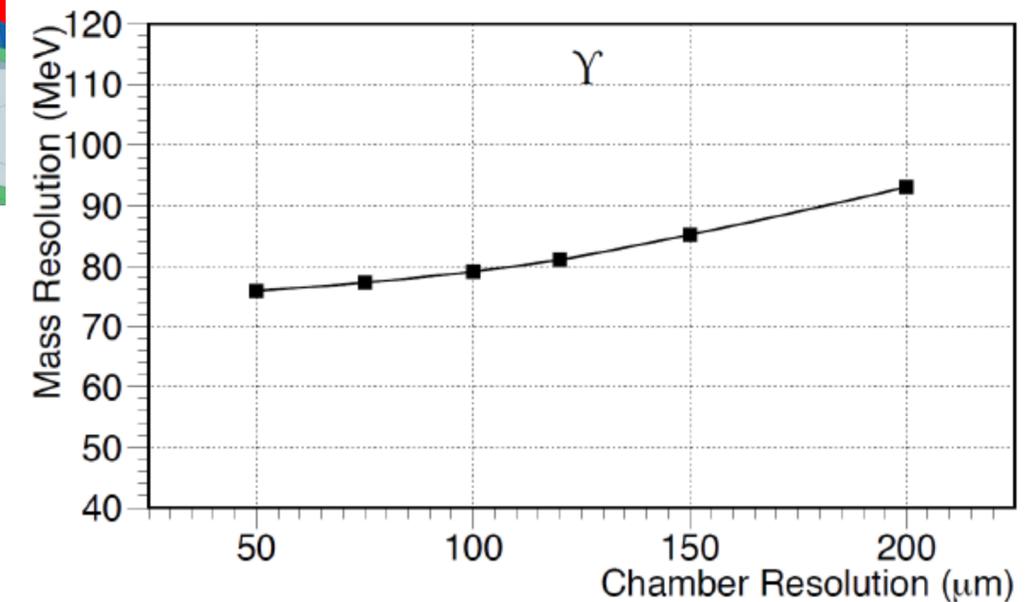
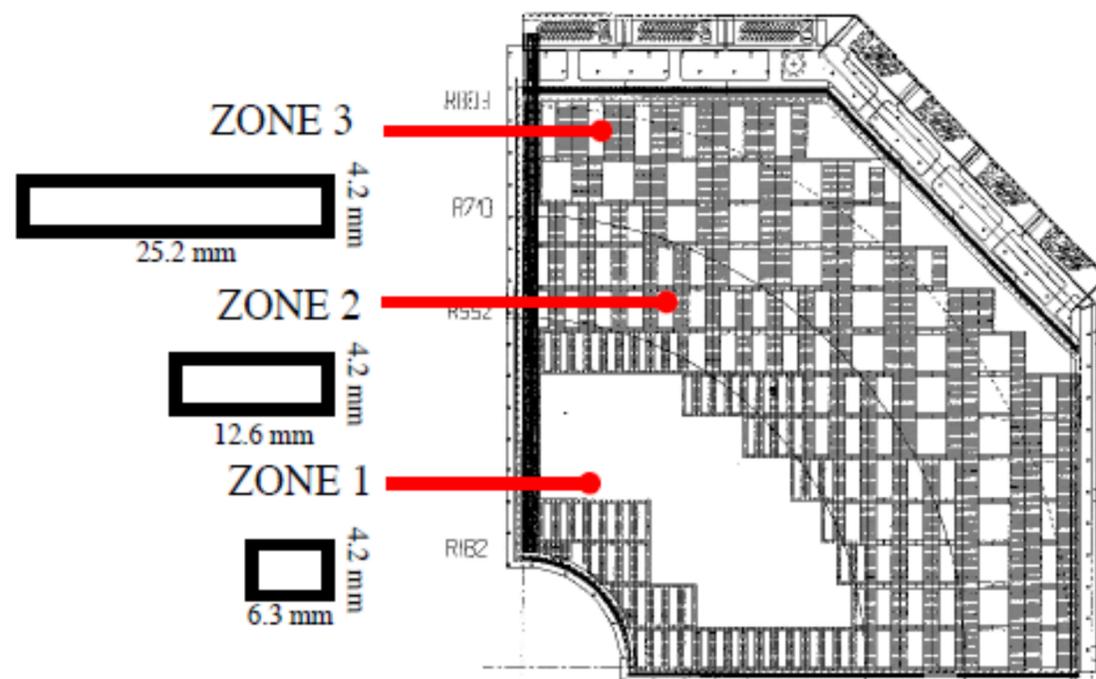
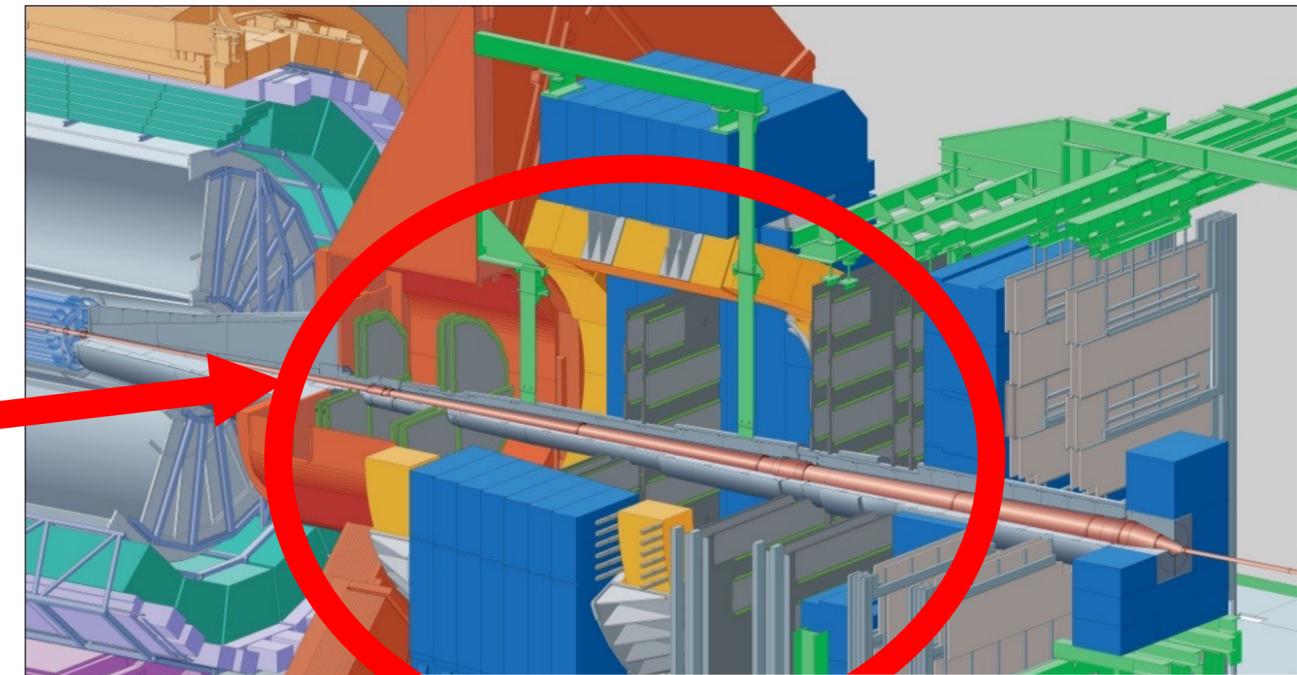


Objectif : obtenir une résolution intrinsèque des chambres $< 100 \mu\text{m}$ dans le plan de déviation de l'aimant

Les chambres de trajectographie

Chambre à fil à cathodes segmentées

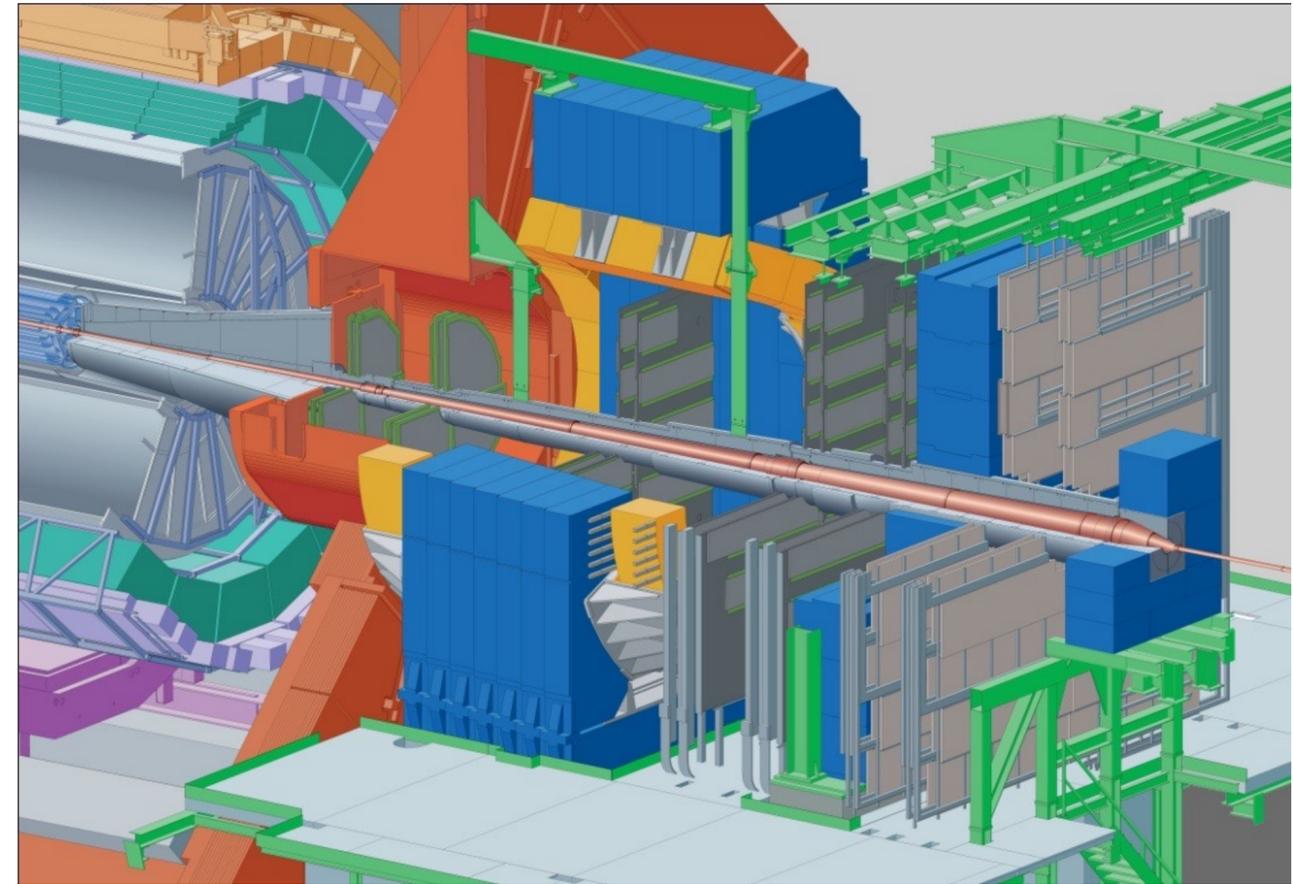
- Gaz: Ar (80%) / CO₂(20%)
- Plan d'anode : plan de fils à 1650 V
- Plan de cathode: mince couche d'or



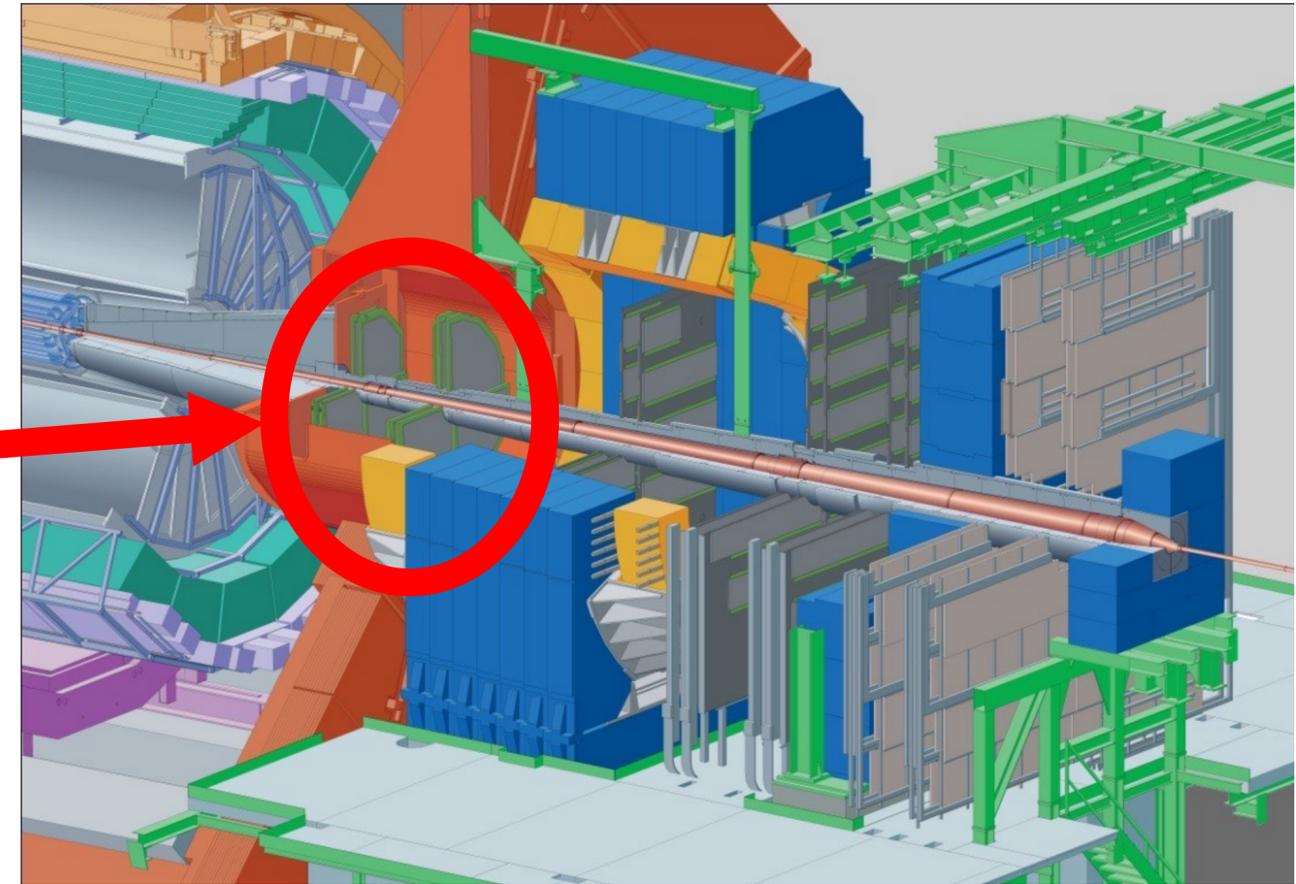
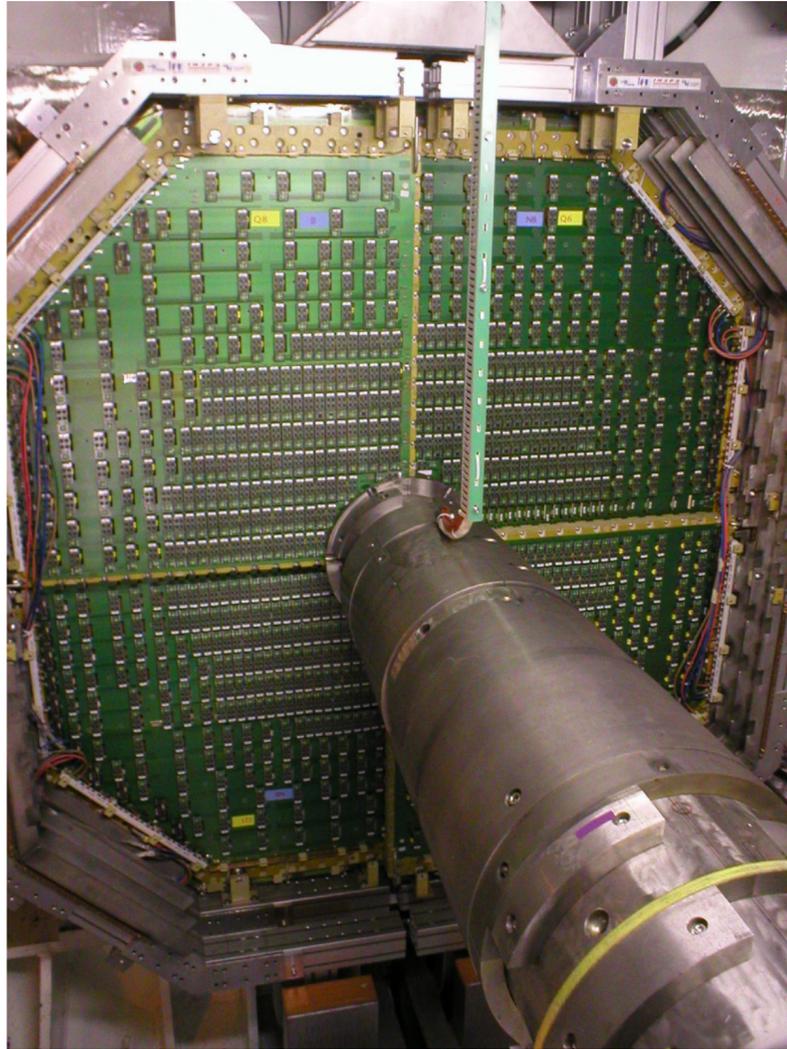
10 chambres → **1.1 10⁶ canaux (pads) à lire !**

Objectif : obtenir une résolution intrinsèque des chambres < 100 μm dans le plan de déviation de l'aimant

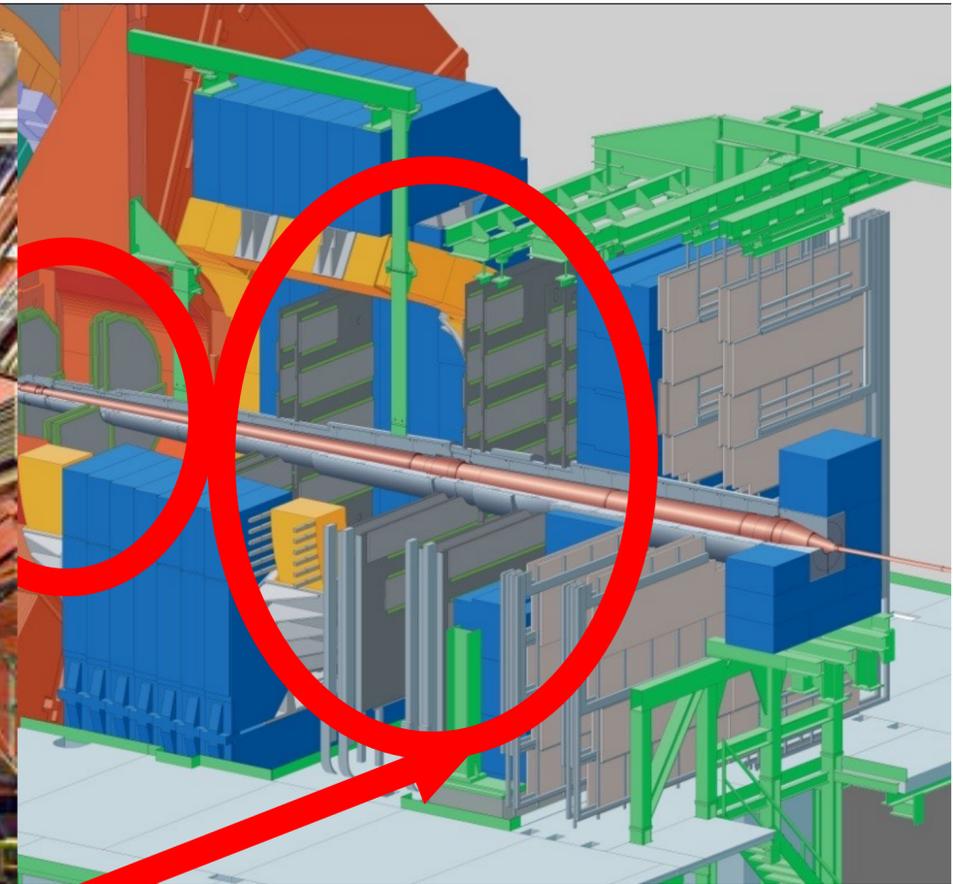
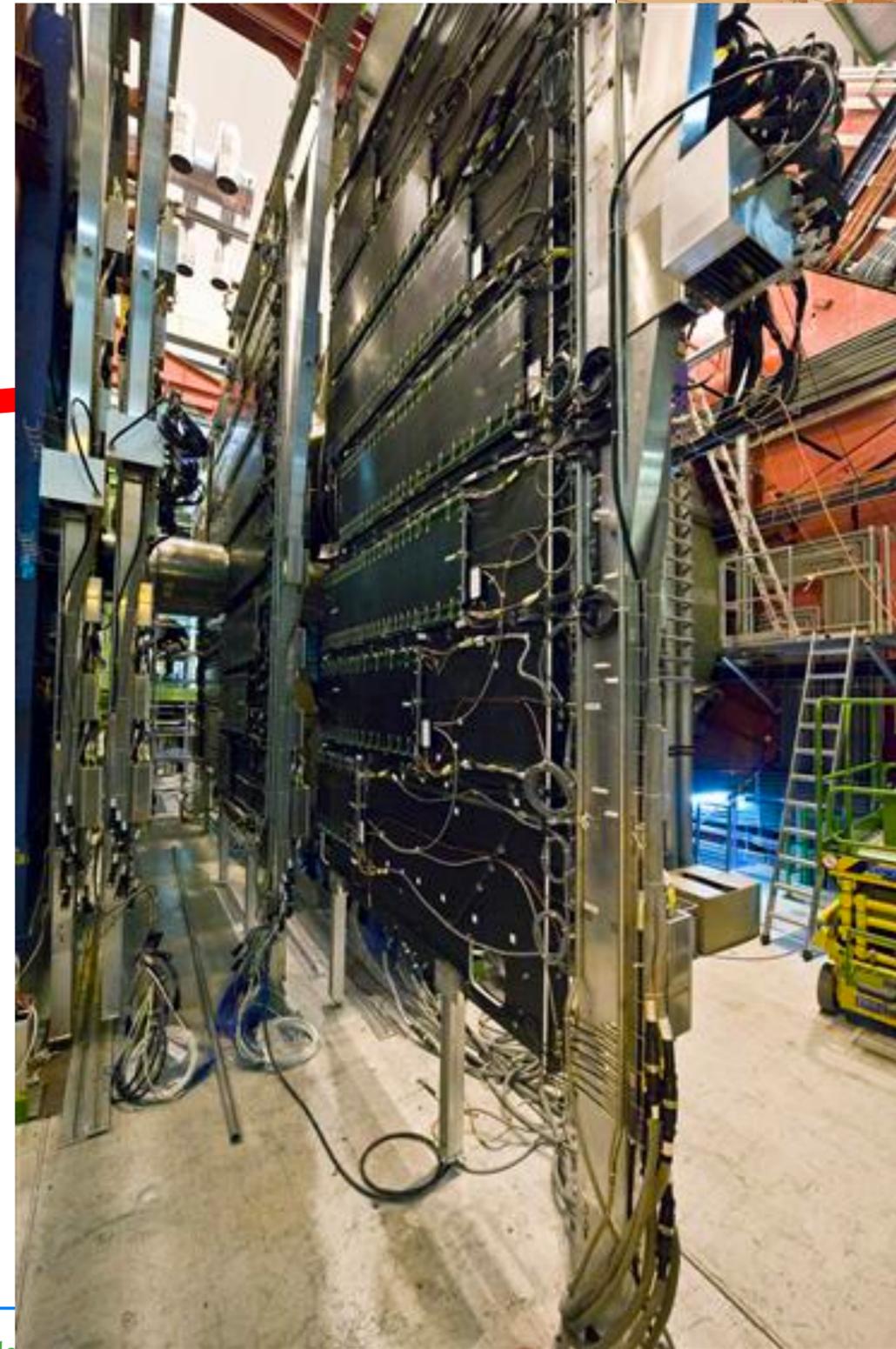
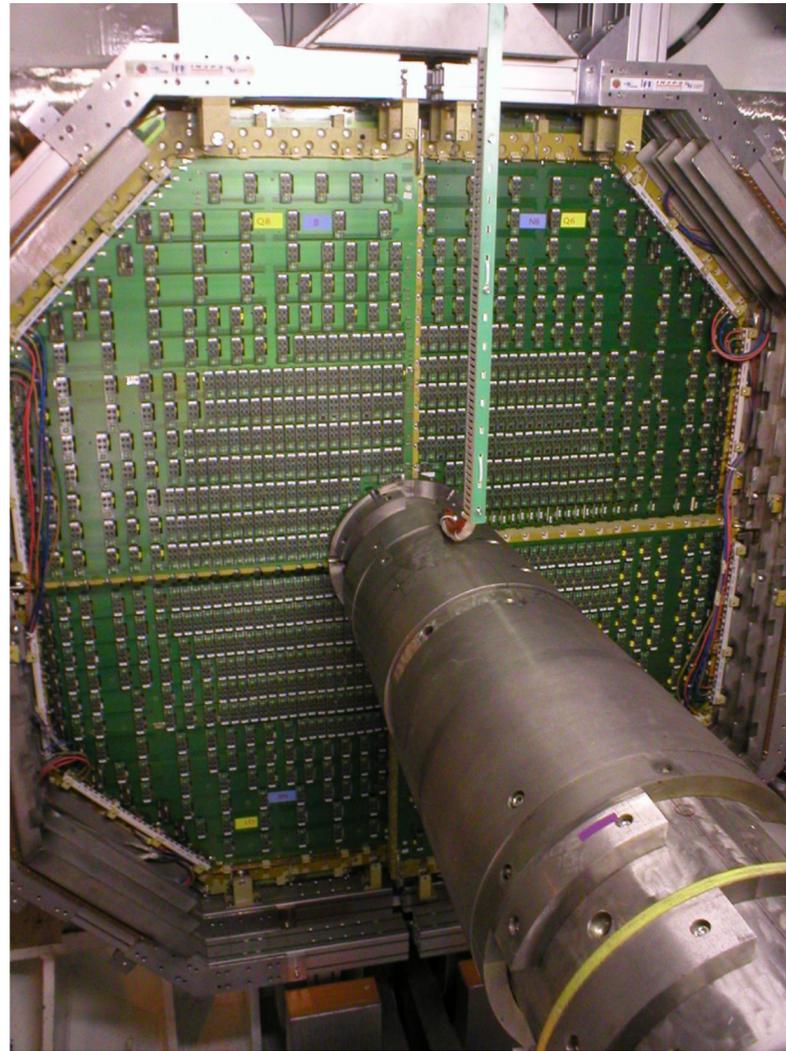
Les chambres de trajectographie



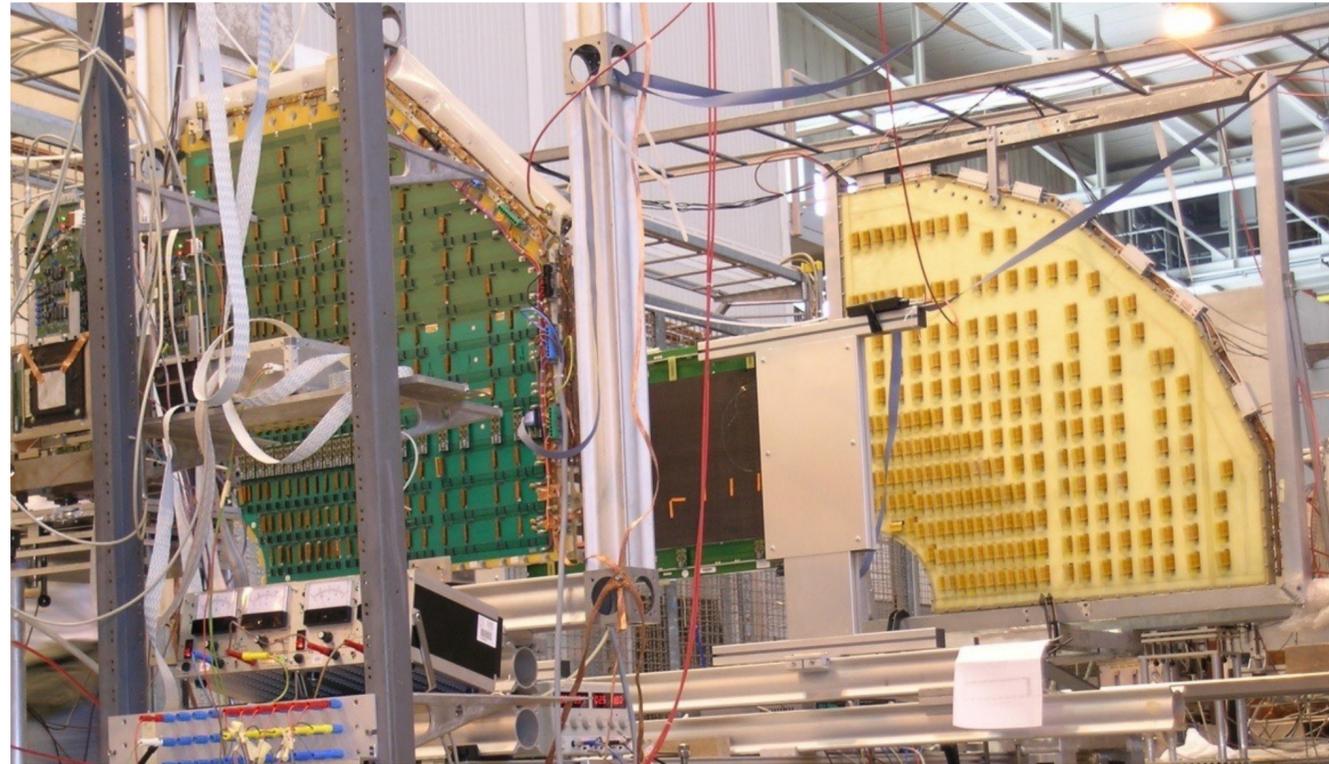
Les chambres de trajectographie



Les chambres de trajectographie

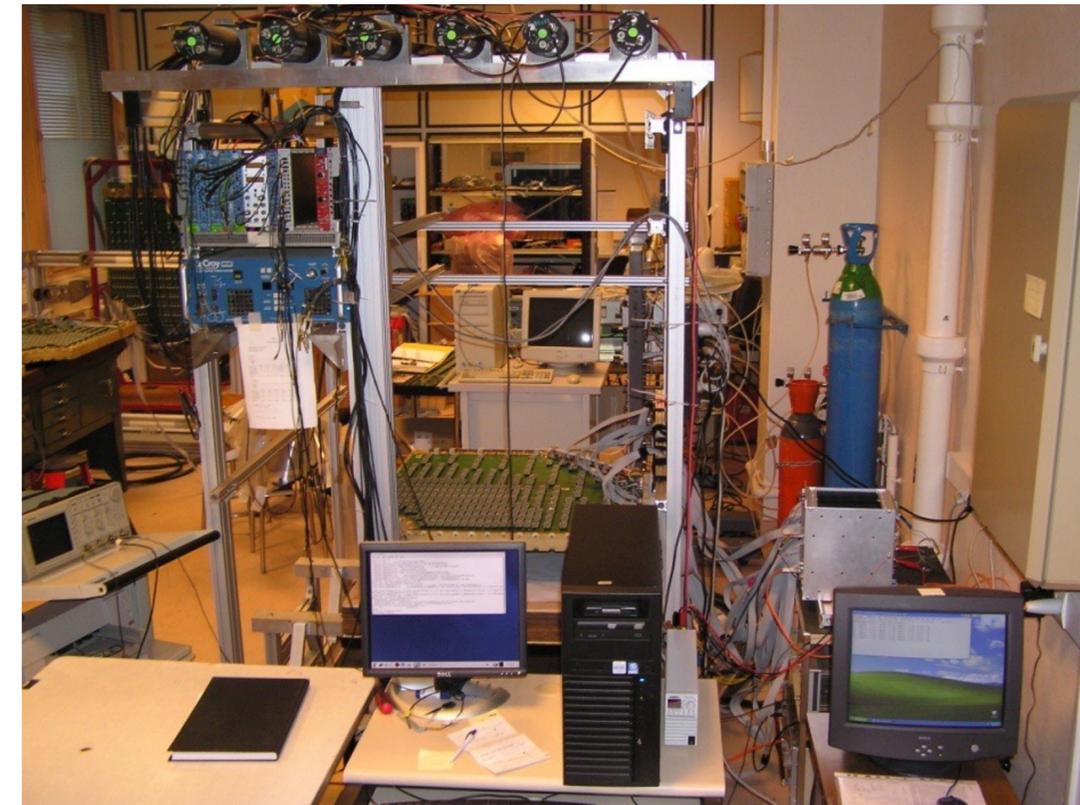


Les chambres de trajectographie



Tests en faisceau au CERN du prototype final de quadrant et de l'électronique

Tests en cosmique de chaque quadrant équipé de son électronique avant installation en caverne



Les chambres de trajectographie

Augmentation du taux d'interaction et
du flux de particules entre 2008 et 2018
→ nombreux claquages haute tension à
haut taux de particules



Les chambres de trajectographie

Augmentation du taux d'interaction et du flux de particules entre 2008 et 2018
→ nombreux claquages haute tension à haut taux de particules

Chambres ouvertes et nettoyées, et beaucoup de fils changés. Ex : traces de colle sur les pads des cathodes qui provoquent une accumulation de charge (effet Malter) et des claquages HT.



Les chambres de trajectographie

Augmentation du taux d'interaction et du flux de particules entre 2008 et 2018
→ nombreux claquages haute tension à haut taux de particules

Chambres ouvertes et nettoyées, et beaucoup de fils changés. Ex : traces de colle sur les pads des cathodes qui provoquent une accumulation de charge (effet Malter) et des claquages HT.



Les chambres de trajectographie

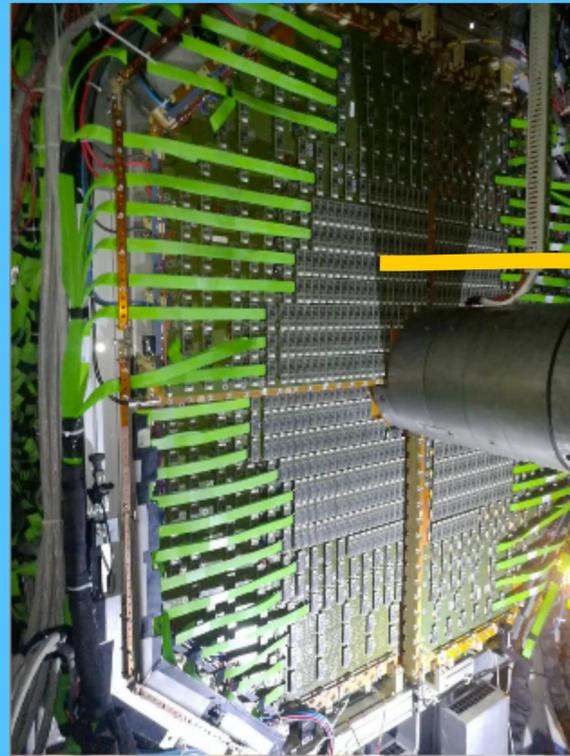
Augmentation du taux d'interaction et du flux de particules entre 2008 et 2018
→ nombreux claquages haute tension à haut taux de particules

Chambres ouvertes et nettoyées, et beaucoup de fils changés. Ex : traces de colle sur les pads des cathodes qui provoquent une accumulation de charge (effet Malter) et des claquages HT.

De l'humidité (vapeur H_2O à 0.1%) a aussi été ajoutée au mélange de gaz Ar/CO_2



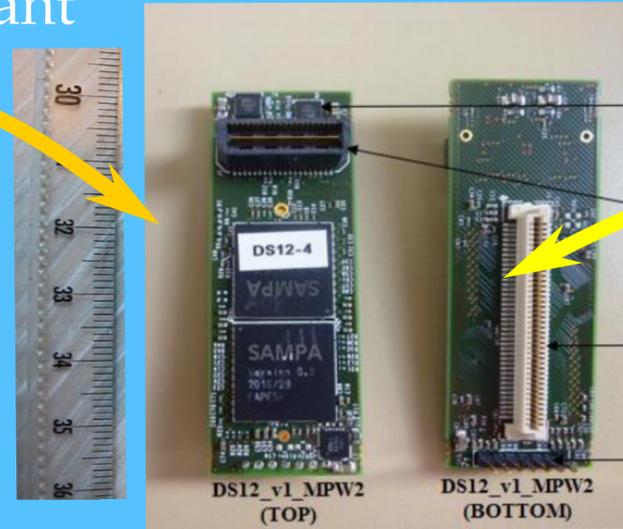
Électronique de lecture



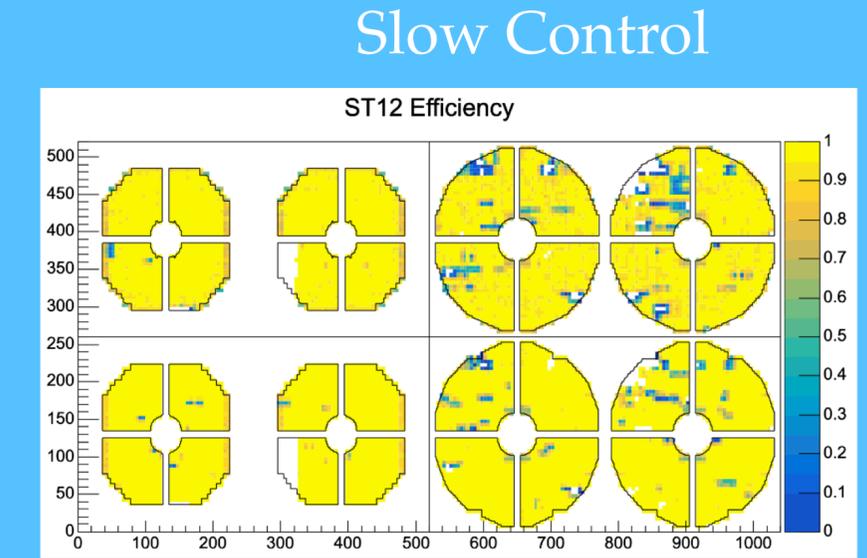
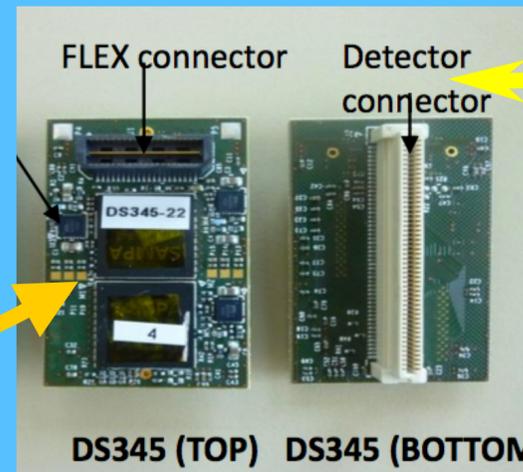
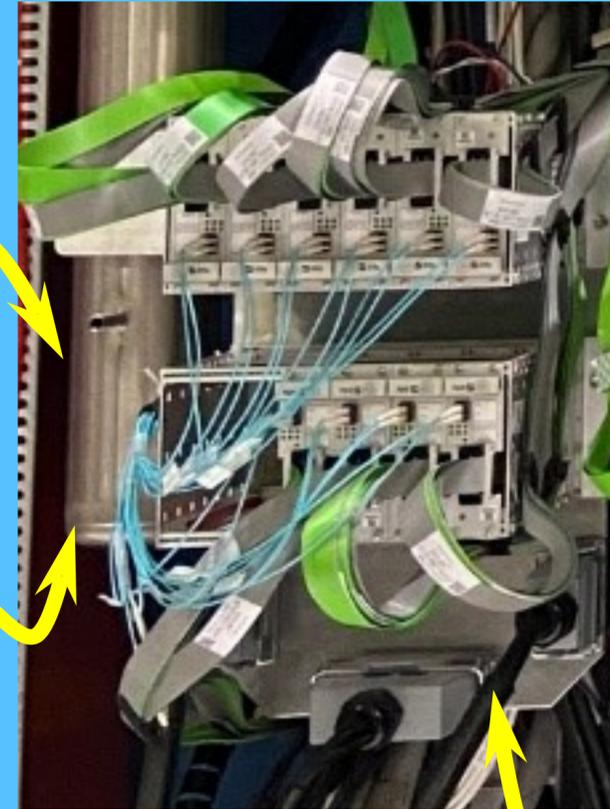
Slat

Quadrant

FEE : Dual Sampa



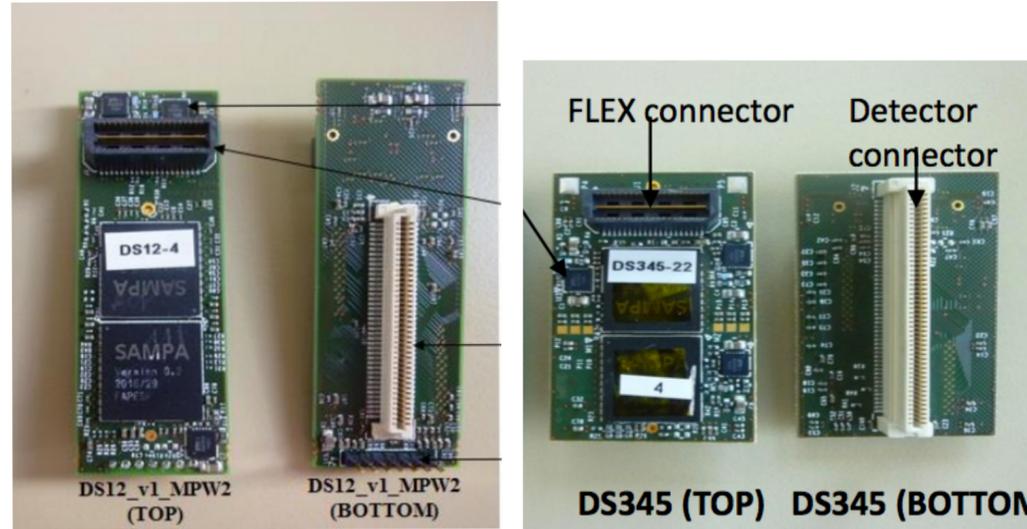
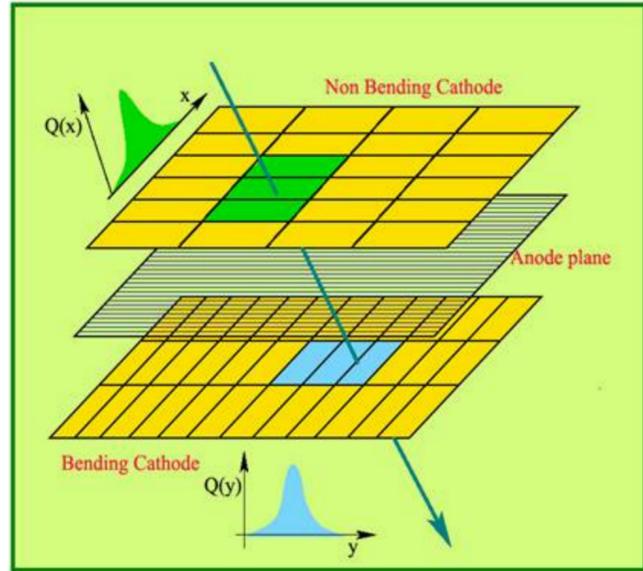
SOLAR : Readout



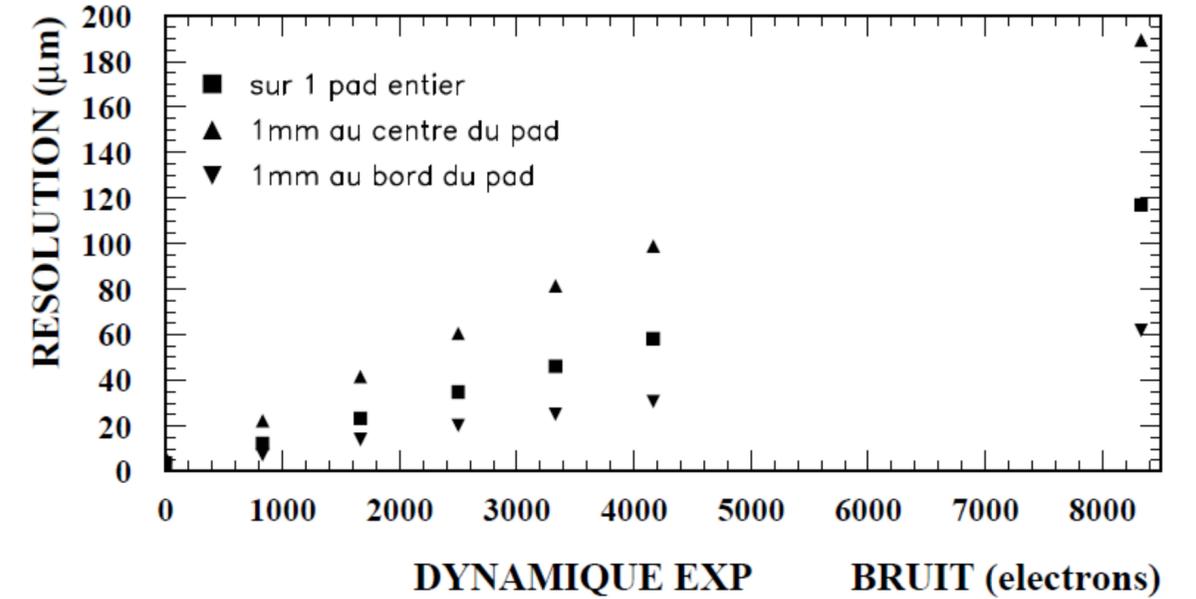
Data Storage

Central DAQ
Common Readout
Unit (CRU)

Electronique de lecture

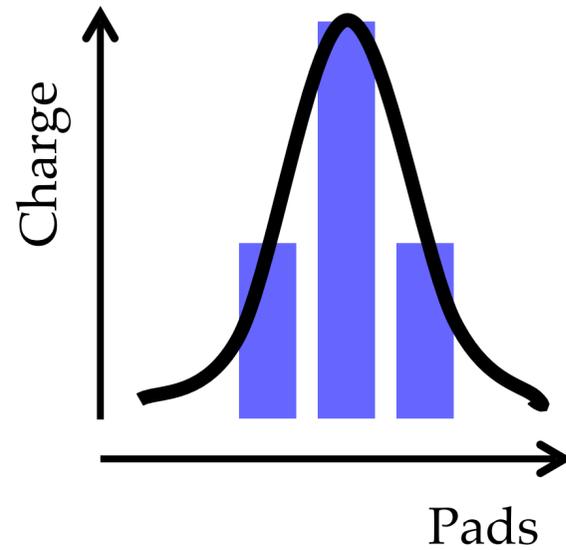


Simulations

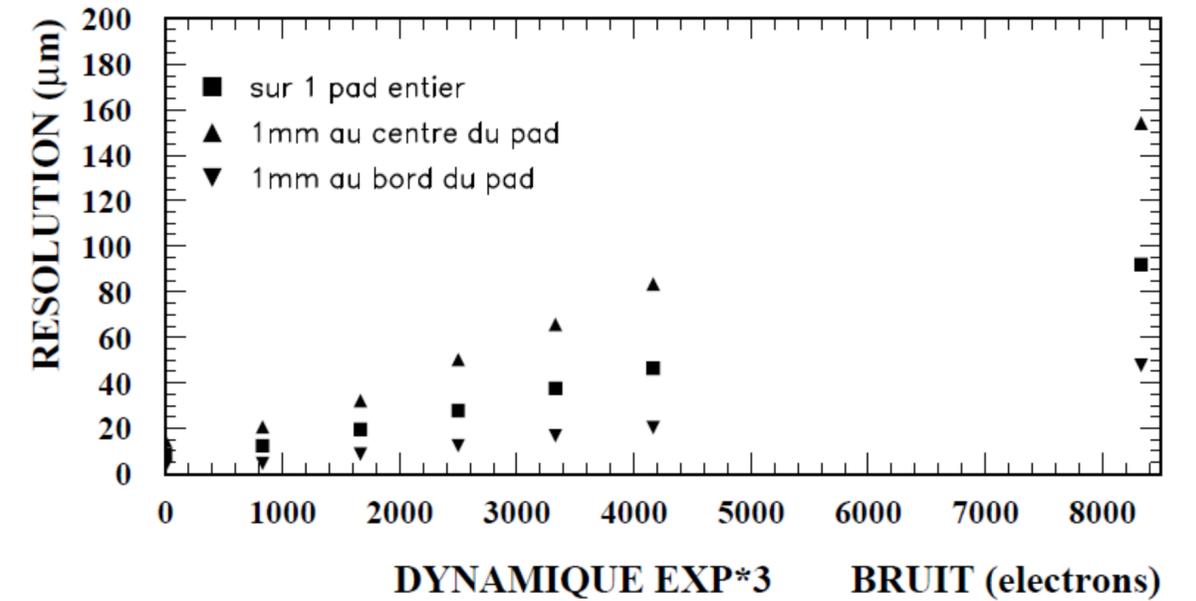
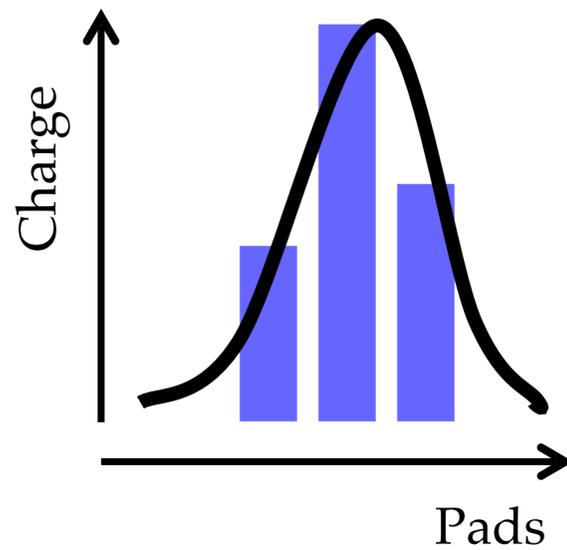


Position reconstruite

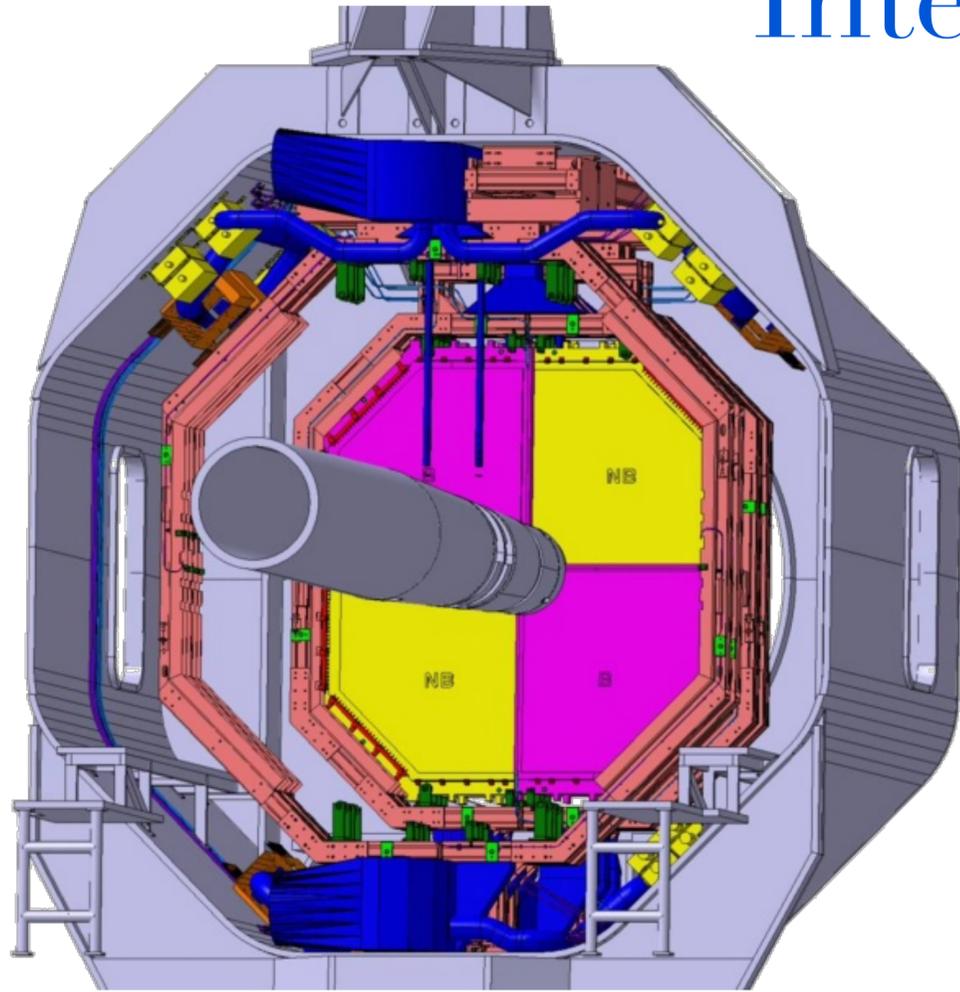
Cas idéal



Cas biaisé

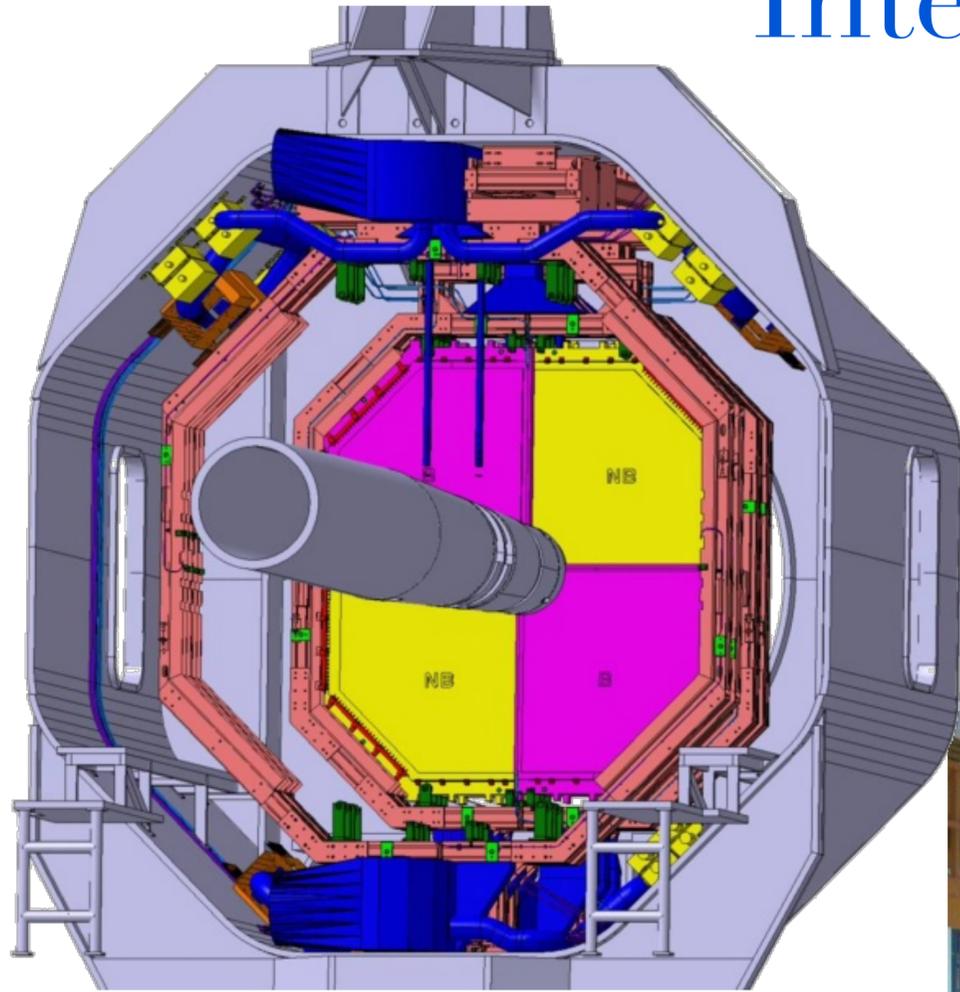


Intégration des détecteurs



Modélisation

Intégration des détecteurs

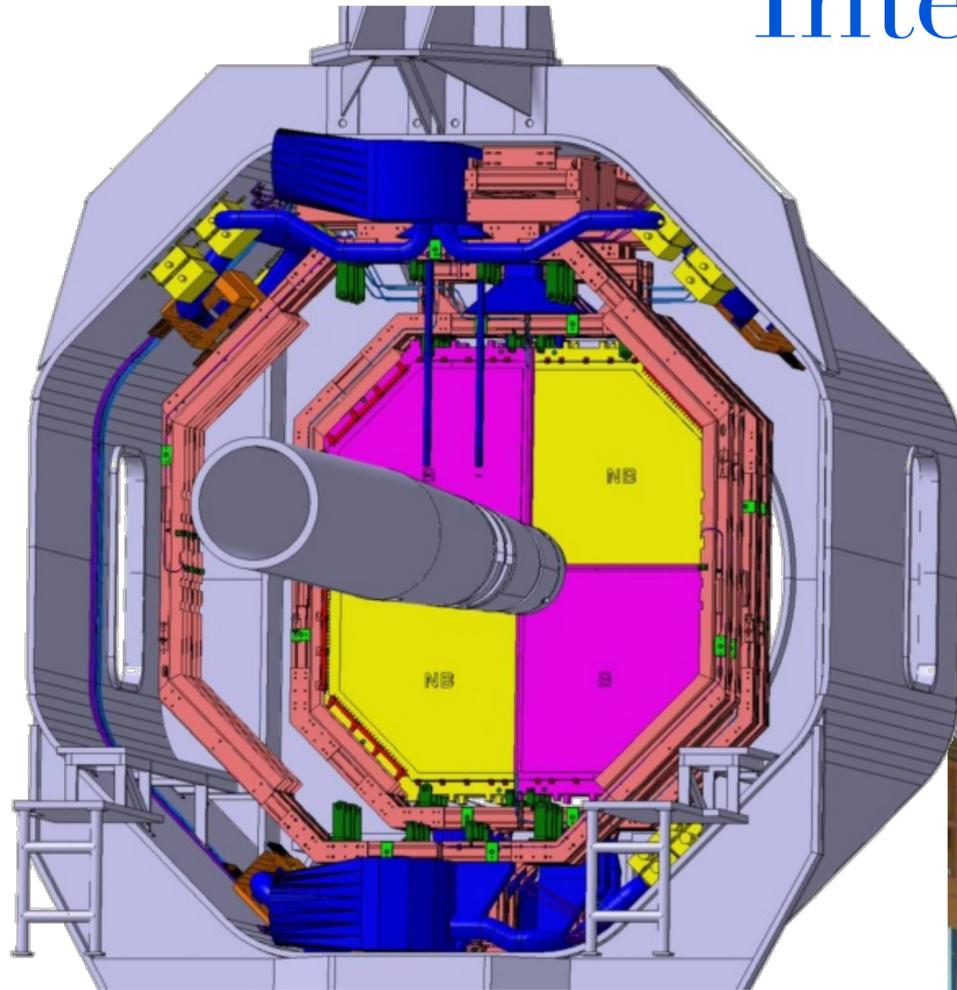


Modélisation

Réalisation d'une
maquette à l'échelle 1

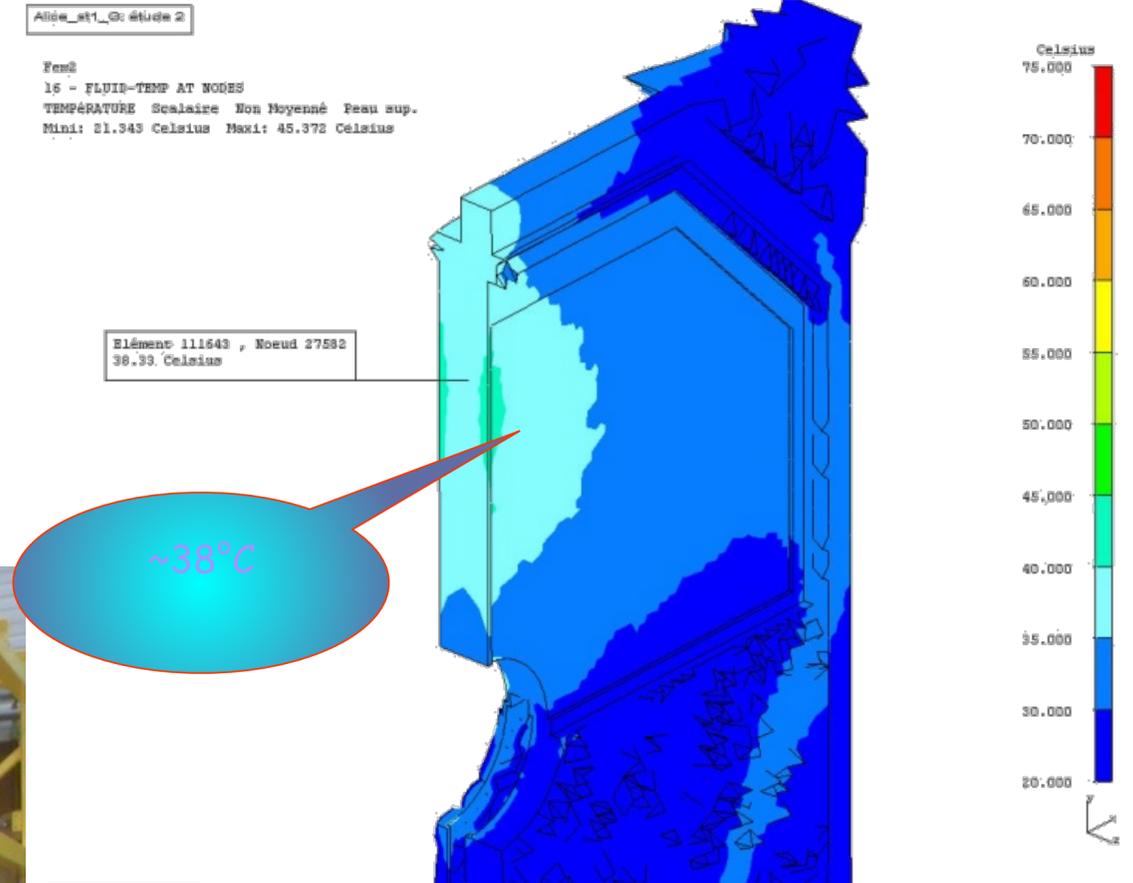


Intégration des détecteurs

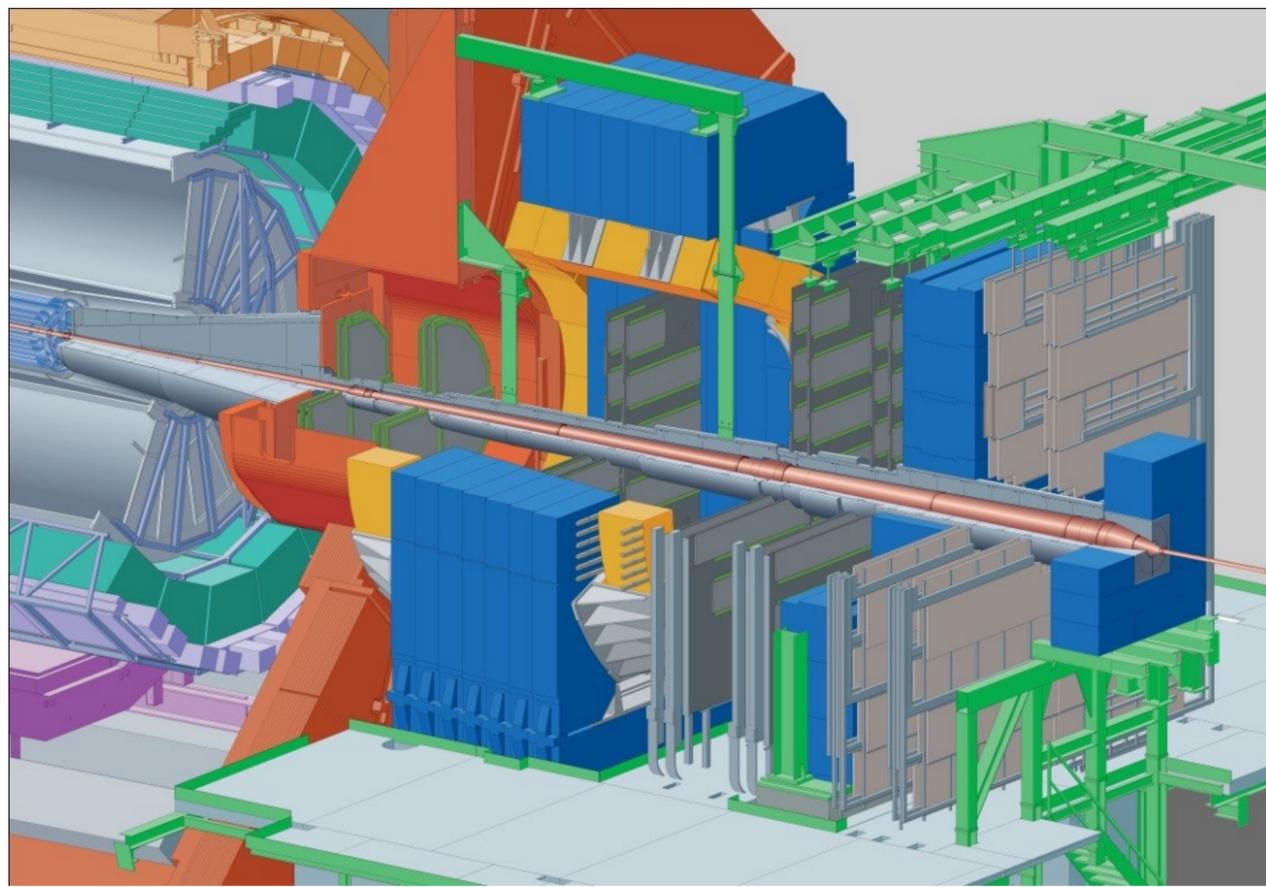


Modélisation

Réalisation d'une
maquette à l'échelle 1

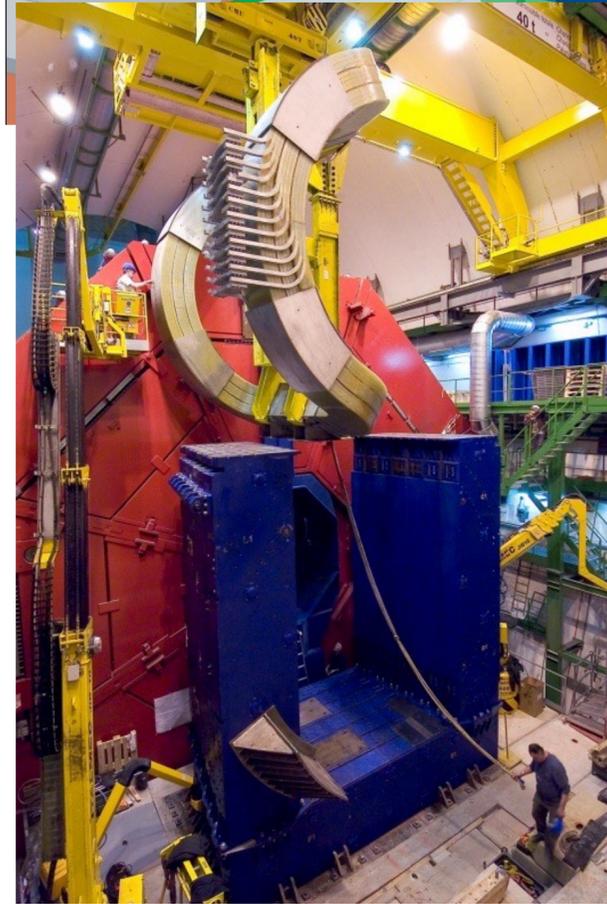
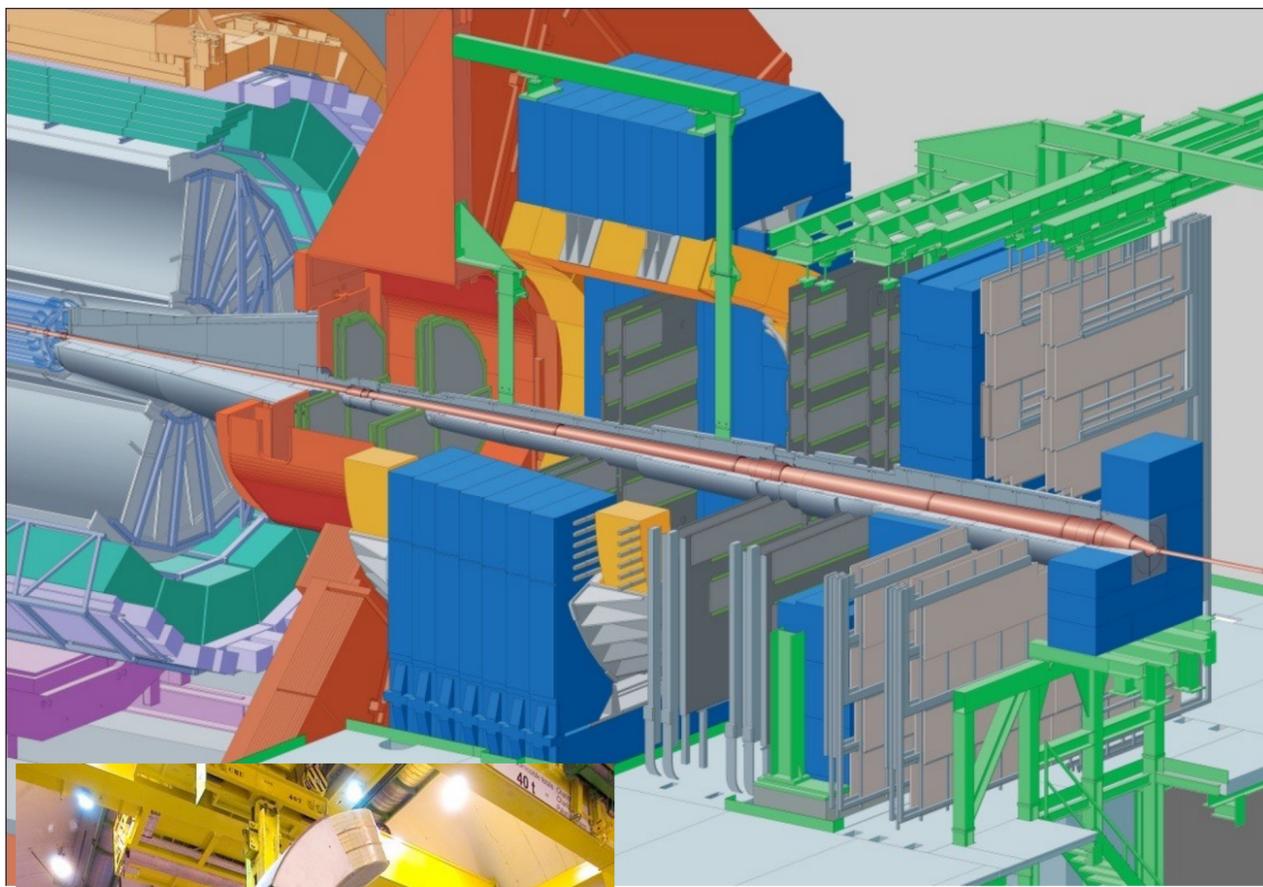


Etude thermique

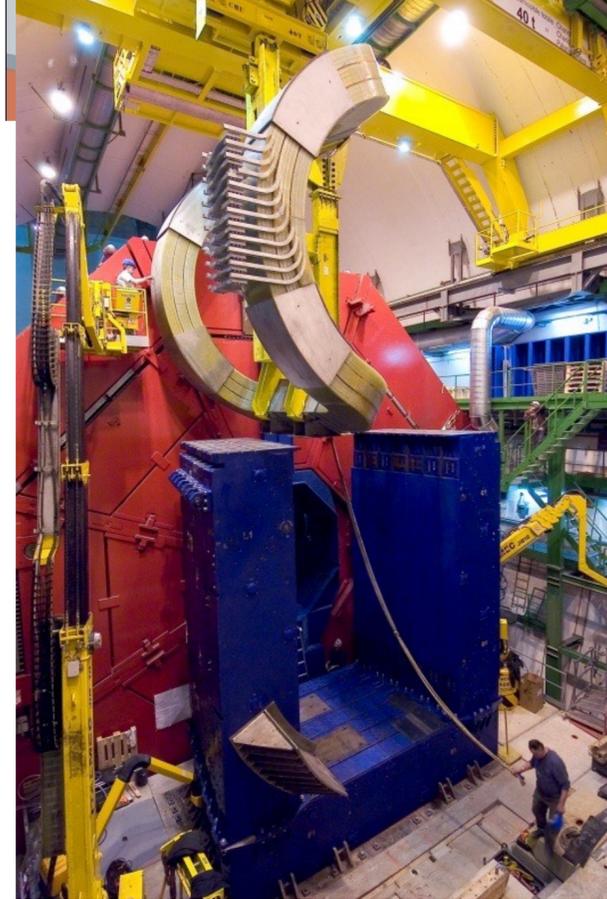
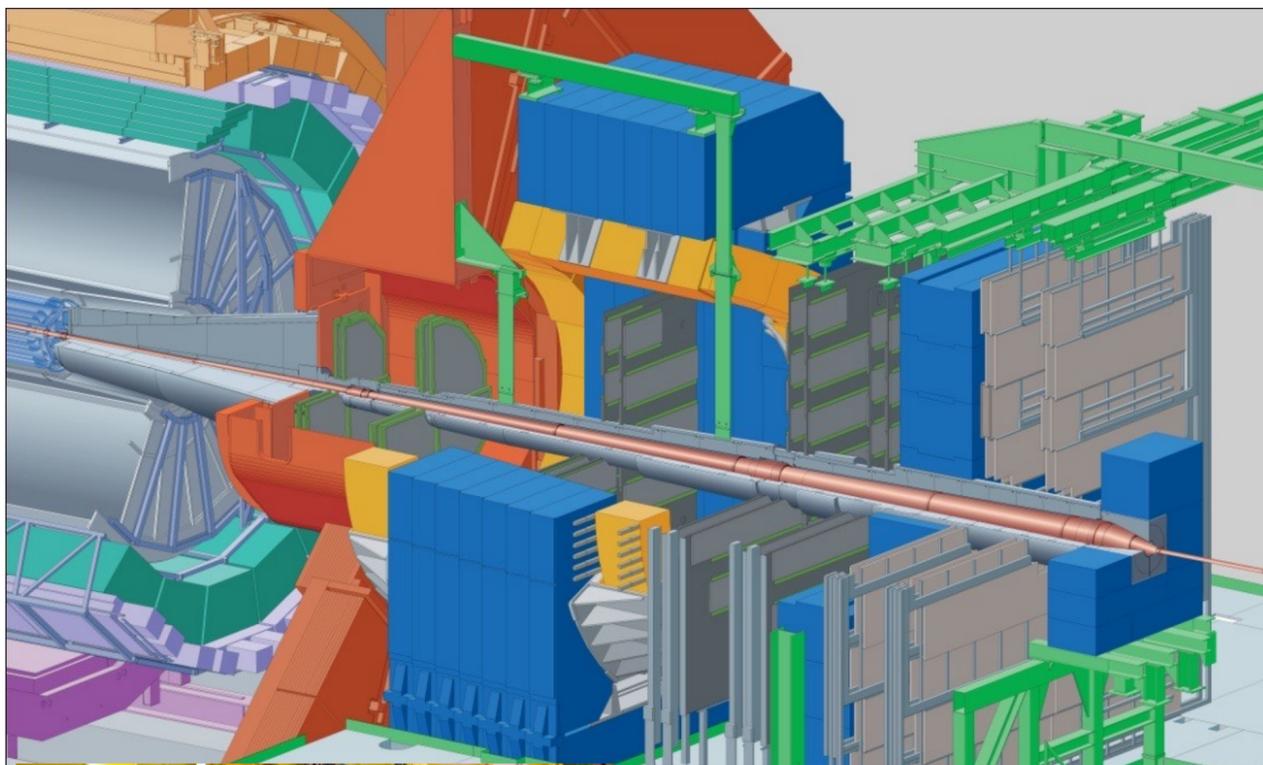


Installation

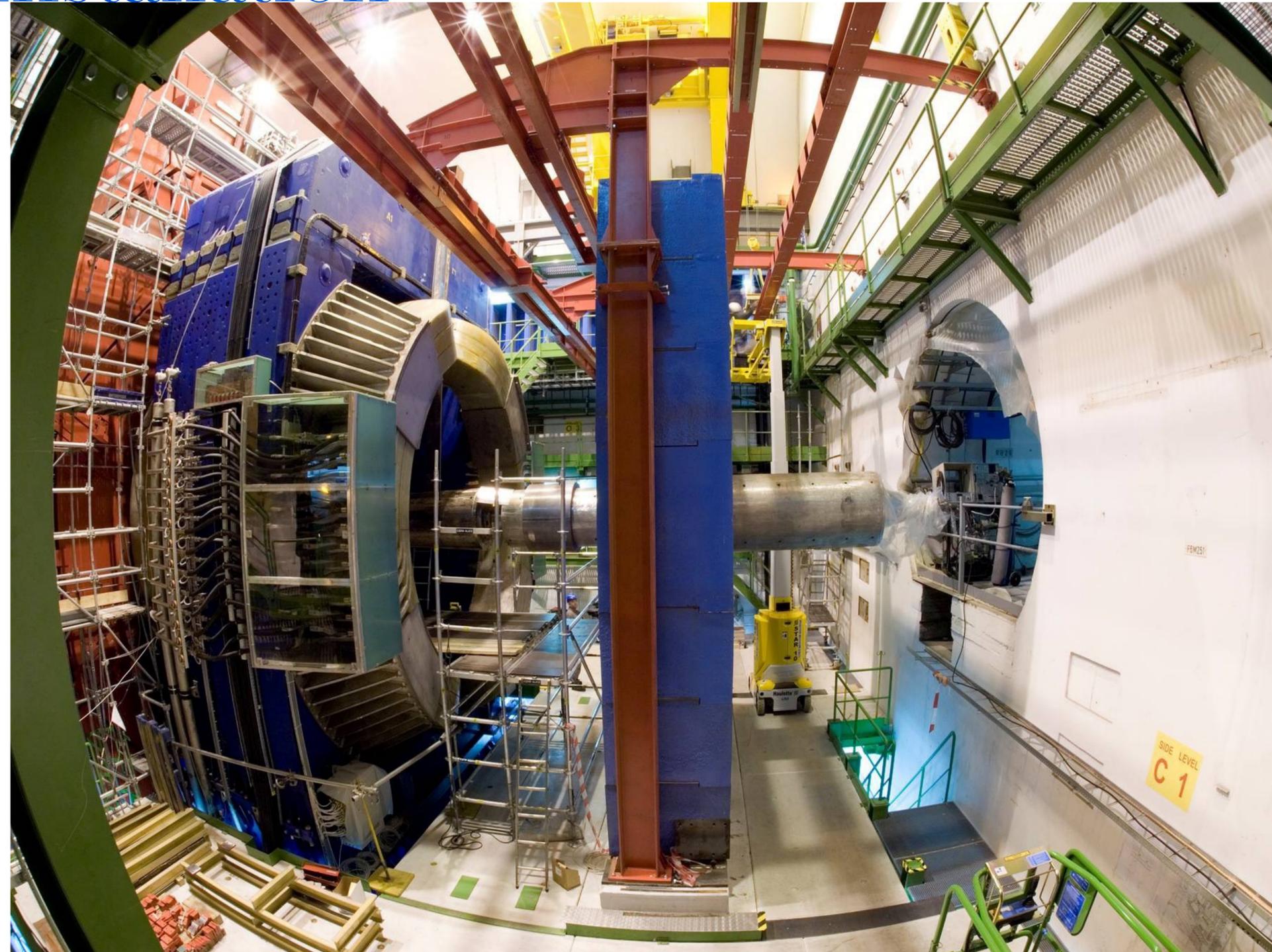
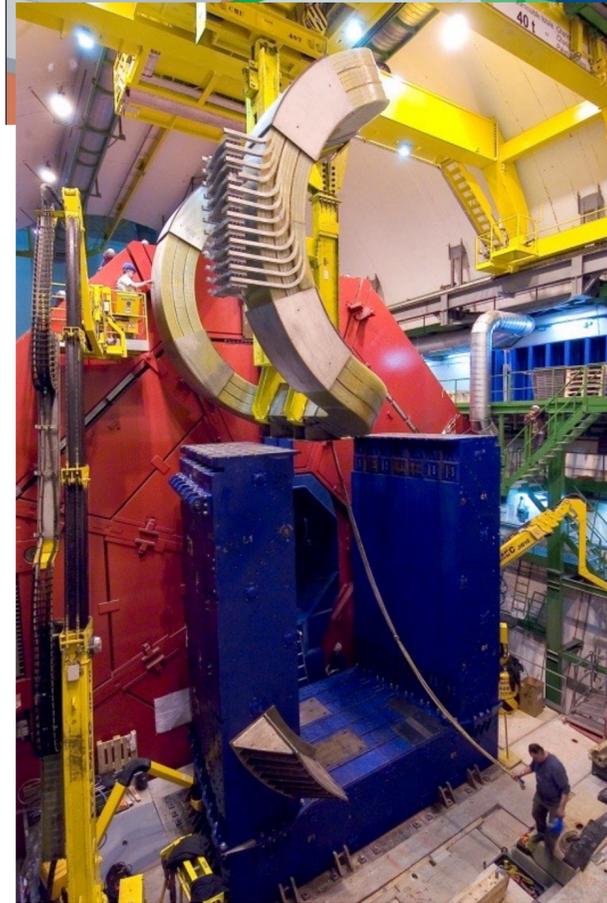
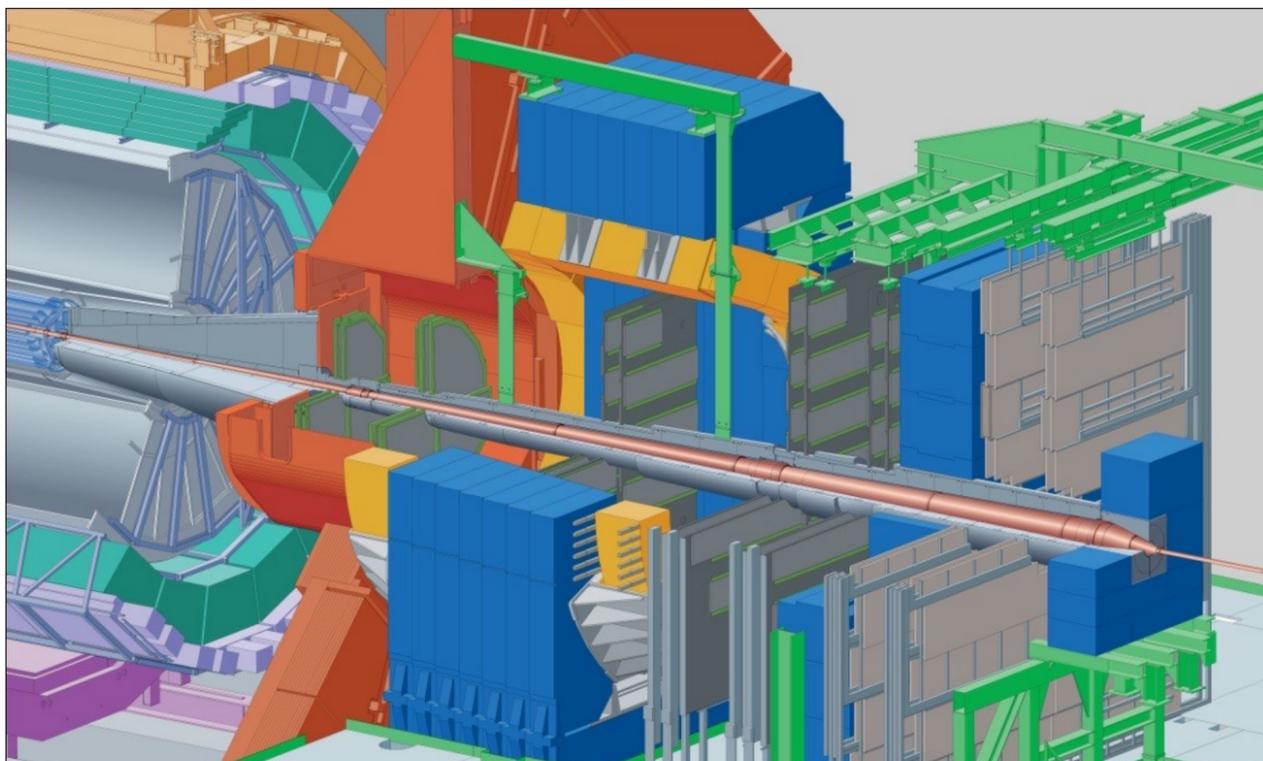
Installation



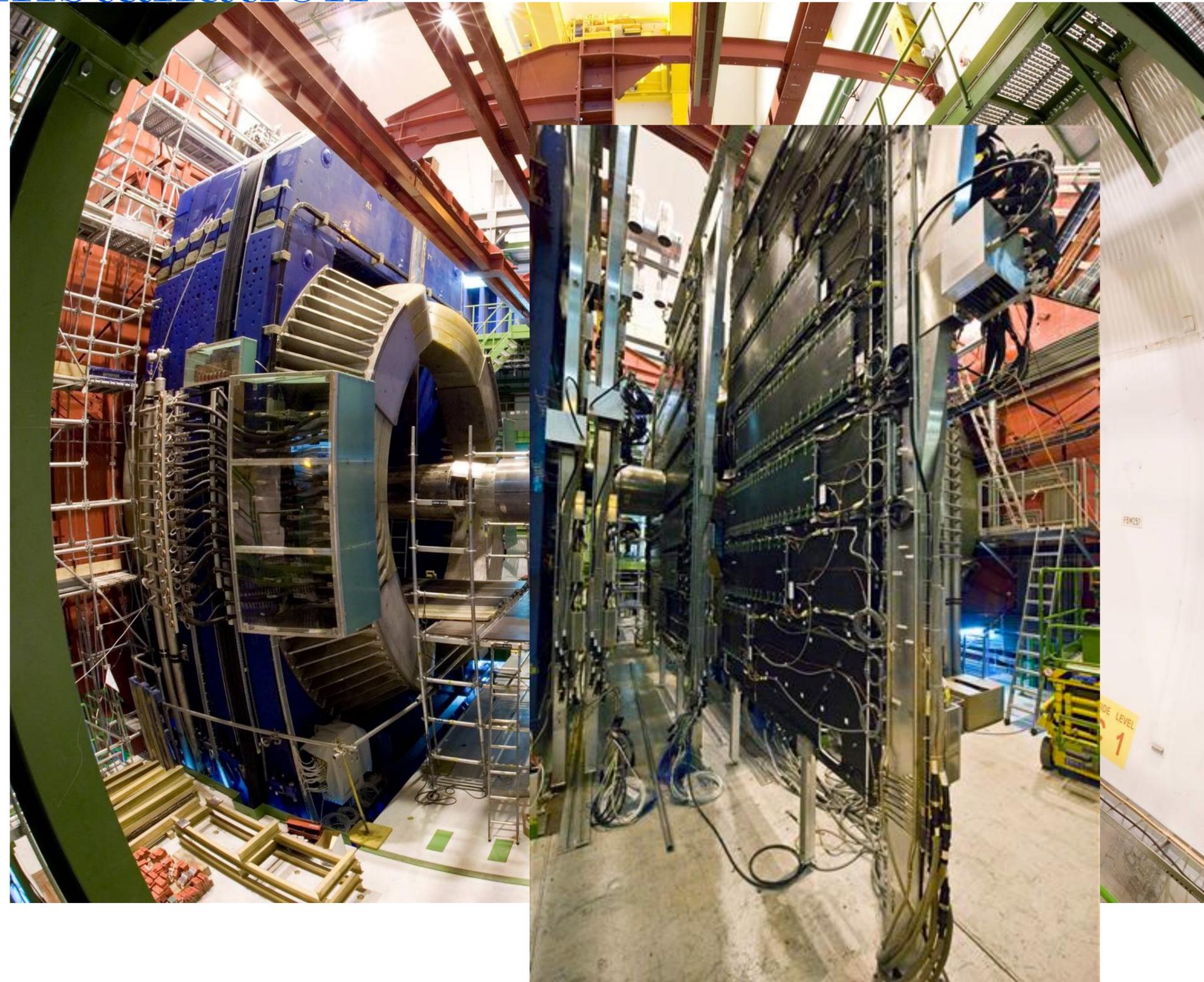
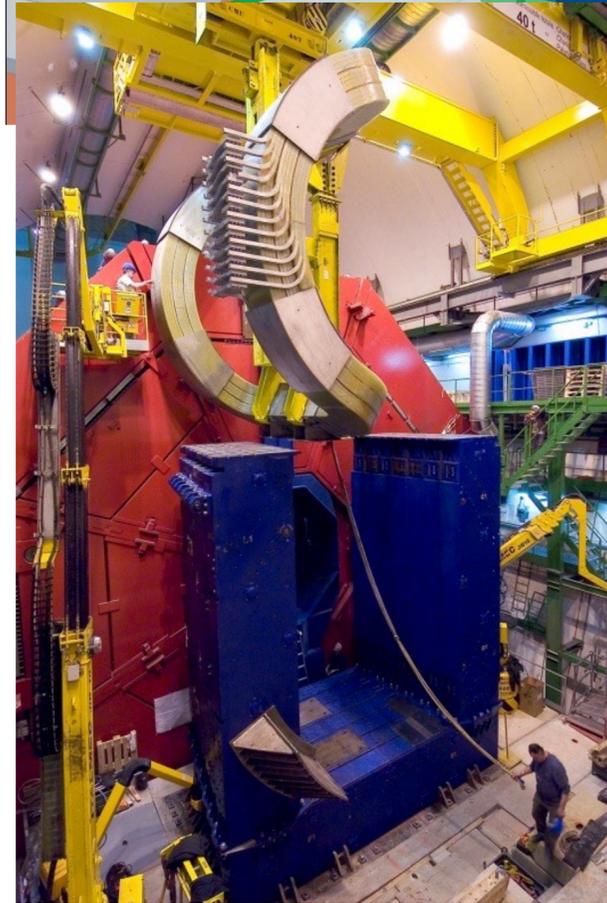
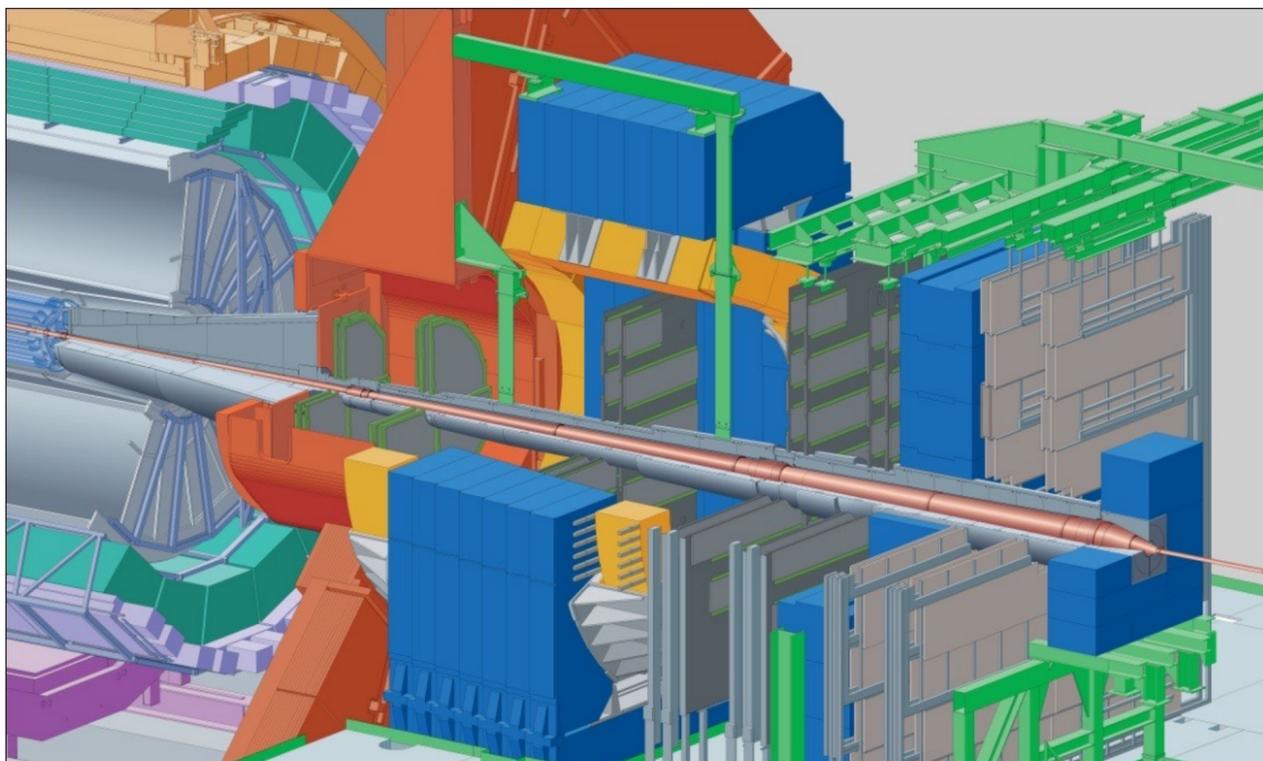
Installation



Installation



Installation



Sommaire

- I. Matière nucléaire et le plasma de quarks et de gluons (QGP)
 - 1. Notions fondamentales et interaction forte
 - 2. Les phases de la matière nucléaire et le QGP
 - 3. Sonder le QGP en laboratoire
- II. De la physique au détecteur**
 - 1. Les accélérateurs d'ions lourds ultra-relativistes
 - 2. Expériences passées et présentes
 - 3. L'expérience ALICE et le spectromètre à muons
 - 4. La vie d'un(e) physicien(ne) sur une expérience**
- III. Résultats et expériences futures
 - 1. Des données aux résultats
 - 2. Des résultats (une sélection) à la théorie
 - 3. Upgrade et expériences futures

Quotidien du personnel de recherche sur une expérience

Lancement de projets, R&D

Construction, mise en service

Suivi et prise de données

Analyse, discussion et publications des résultats



©Lison Bernet

Quotidien du personnel de recherche sur une expérience

Lancement de projets, R&D

Construction, mise en service

Suivi et prise de données

Analyse, discussion et publications des résultats



©Lison Bernet

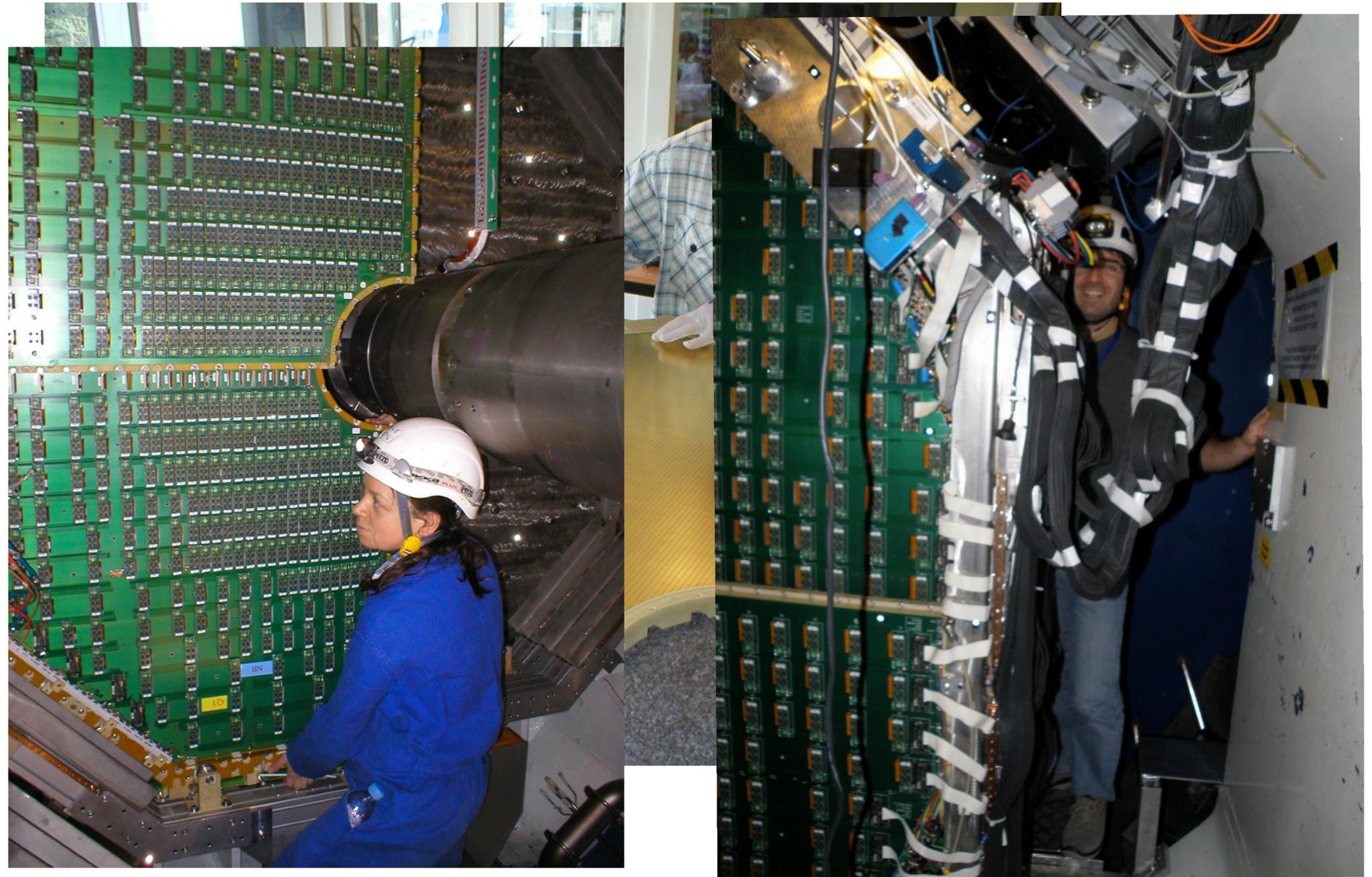
Quotidien du personnel de recherche sur une expérience

Lancement de projets, R&D

Construction, mise en service

Suivi et prise de données

Analyse, discussion et publications des résultats



©Lison Bernet

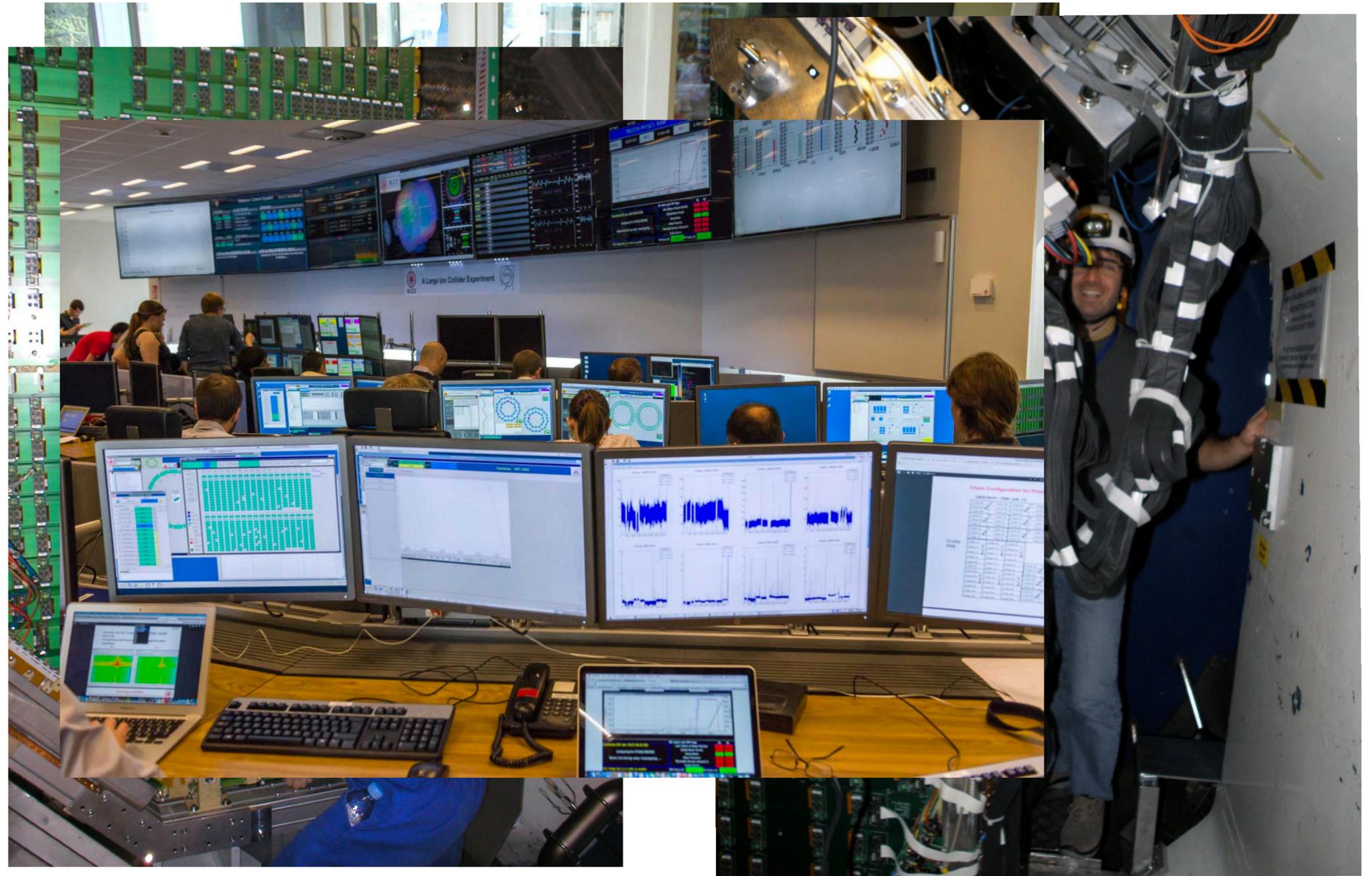
Quotidien du personnel de recherche sur une expérience

Lancement de projets, R&D

Construction, mise en service

Suivi et prise de données

Analyse, discussion et publications des résultats



©Lison Bernet

Quotidien du personnel de recherche sur une expérience

Lancement de projets, R&D

Construction, mise en service

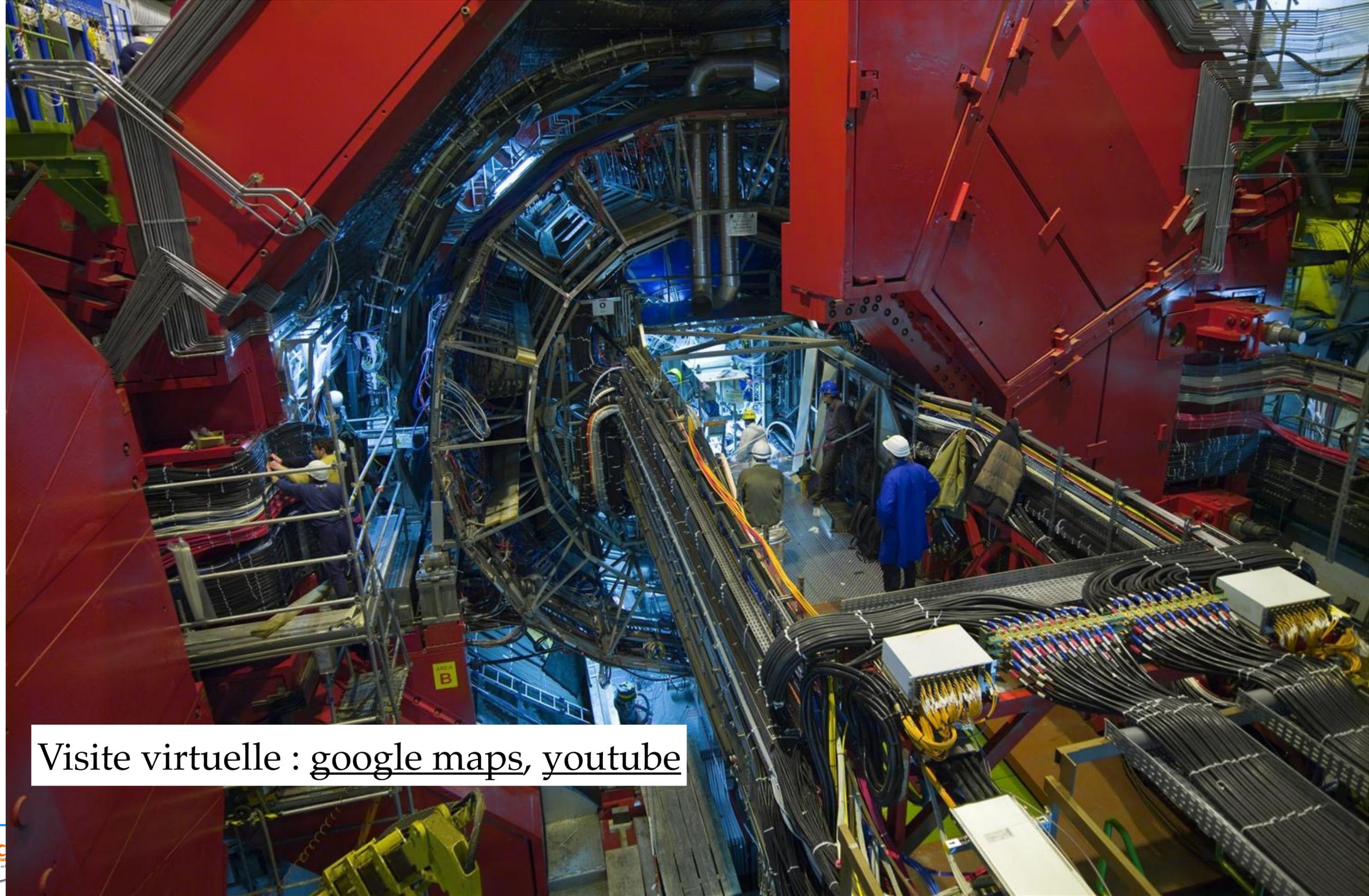
Suivi et prise de données

Analyse, discussion et publications des résultats



©Lison Bernet

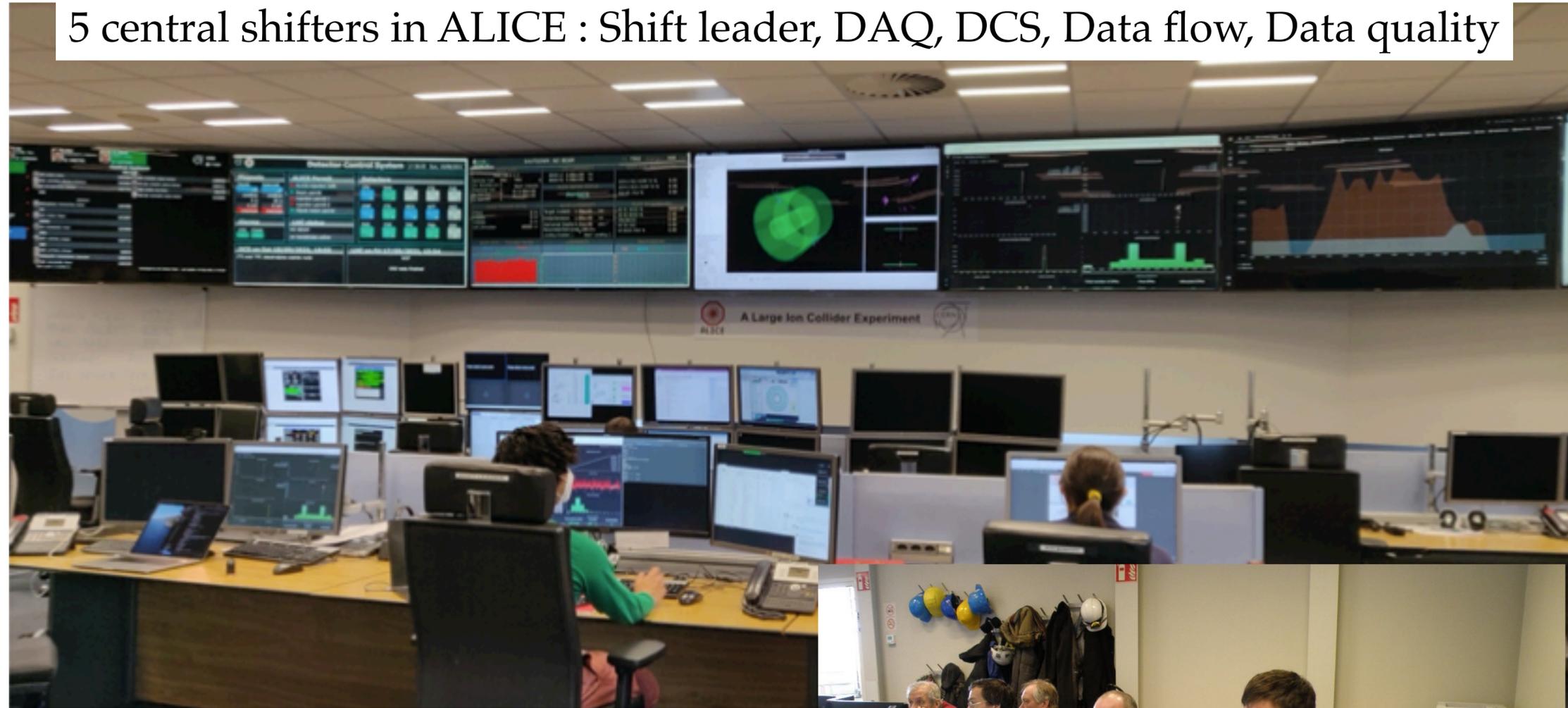
Dans la caverne ALICE, pendant les arrêts techniques



Visite virtuelle : [google maps](#), [youtube](#)

La salle de contrôle d'ALICE

5 central shifters in ALICE : Shift leader, DAQ, DCS, Data flow, Data quality



Detector experts (oncall)



Extrait du Film "Anges et Démons" à 1min40

Un mot sur l'environnement

L'année du CERN pour la sensibilisation à l'environnement

PRINCIPAUX OBJECTIFS ENVIRONNEMENTAUX DU CERN

Émissions

Émissions directes de gaz à effet de serre : 192 100 tonnes d'équivalent CO₂*
Réduire les émissions directes de gaz à effet de serre de 28 % d'ici à fin 2024.

Énergie

Consommation d'électricité : 1 251 GWh*
 limiter à 5 % la hausse de la consommation d'électricité d'ici à fin 2024.

Eau

Consommation d'eau : 3 477 mégalitres*
 limiter à 5 % la hausse de la consommation d'eau d'ici à fin 2024.

Déchets

Taux de recyclage des déchets non dangereux : 56 %*
 Augmenter le taux de recyclage

Rayonnements ionisants

Rayonnements ionisants : <0,02 mSv/an* pour le public
 Faire en sorte que l'exposition aux rayonnements ionisants des populations vivant à proximité du CERN soit maintenue à un niveau négligeable.

*Valeurs pour 2018, dernière année avant le deuxième long arrêt

Découvrez les groupes qui travaillent sur ces questions en scannant ce QR code



HSE
Unité Santé et sécurité au travail
et protection de l'environnement

Objectifs environnementaux du CERN

Ex: recirculation, récupération et réparation des fuites pour les gaz fluorés (~80% des émissions de gaz à effet de serre du CERN), et utilisation future de CO₂ comme réfrigérant lorsque possible.

Objectif : bilan gaz effet de serre (BGES scope1) : -28% pour la fin du Run 3 (base 2018)

Un mot sur l'environnement

Objectifs environnementaux du CERN

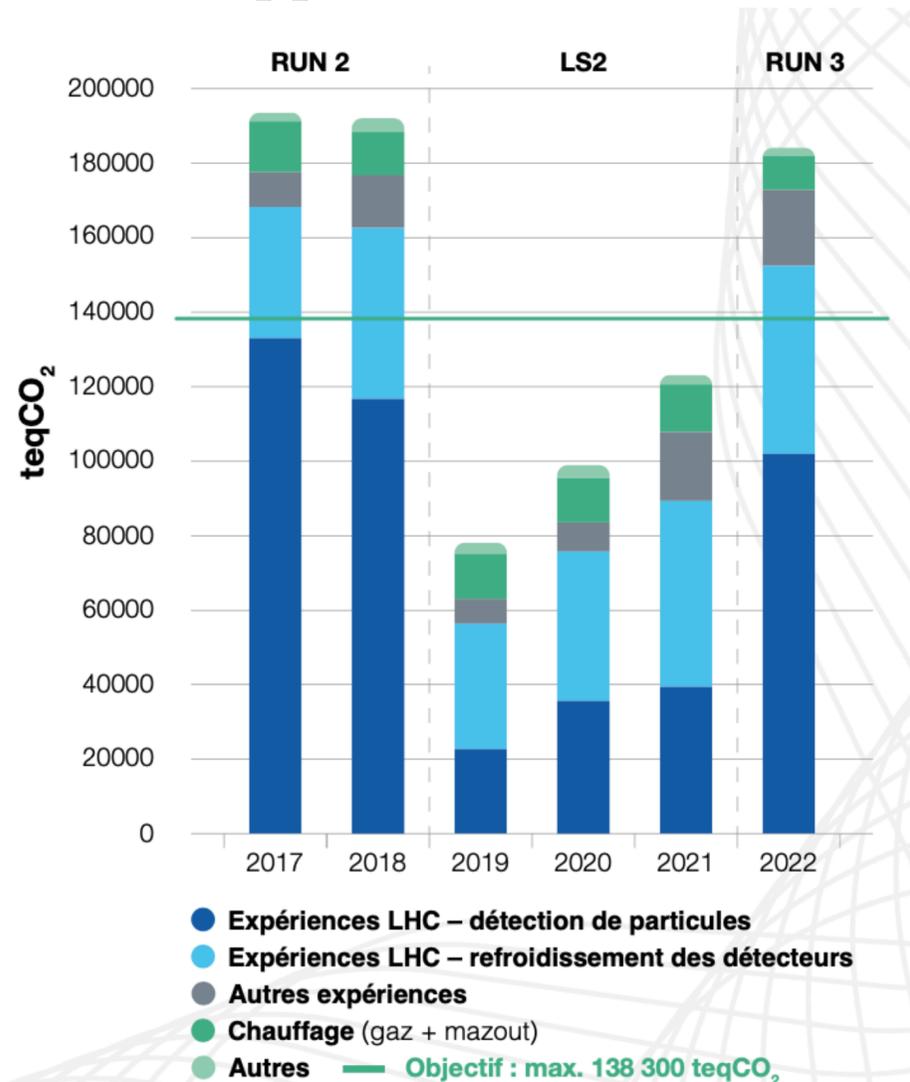
Ex: recirculation, récupération et réparation des fuites pour les gaz fluorés (~80% des émissions de gaz à effet de serre du CERN), et utilisation future de CO₂ comme réfrigérant lorsque possible.

Objectif : bilan gaz effet de serre (BGES scope1) : -28% pour la fin du Run 3 (base 2018)

L'année du CERN pour la sensibilisation à l'environnement

Rapport 2021-2022

TAUX DU CERN



Déchets

Taux de recyclage des déchets non dangereux : 56 %*
Augmenter le taux de recyclage

Rayonnements ionisants

Rayonnements ionisants : <0,02 mSv/an* pour le public
Faire en sorte que l'exposition aux rayonnements ionisants des populations vivant à proximité du CERN soit maintenue à un niveau négligeable.



Ém

Émission de serre d'équiva Réduire de gaz d'ici à fi

Éne

Consom 1 251 G Limiter de la co d'électri

*Valeurs po ur

Dé tra en

Un mot sur l'environnement

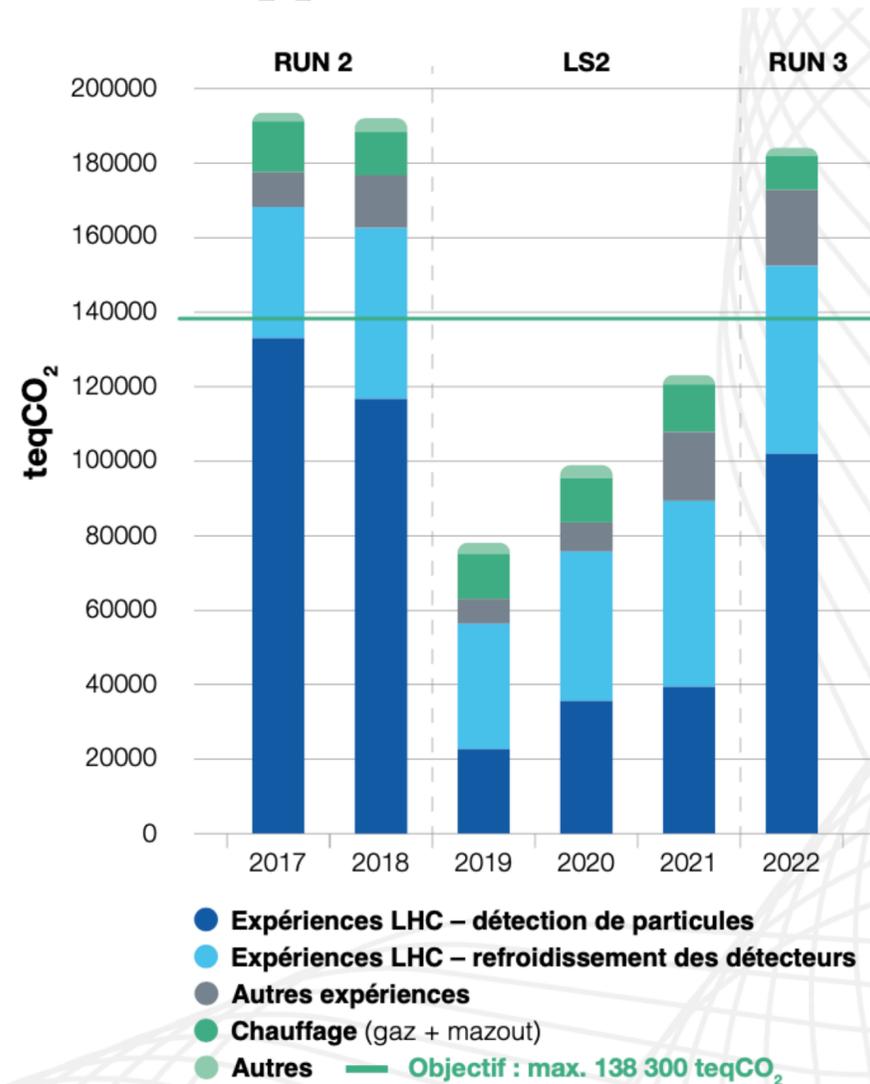
Objectifs environnementaux du CERN

Ex: recirculation, récupération et réparation des fuites pour les gaz fluorés (~80% des émissions de gaz à effet de serre du CERN), et utilisation future de CO₂ comme réfrigérant lorsque

L'année du CERN pour la sensibilisation à l'environnement

Rapport 2021-2022

TAUX DU CERN



En France : GDR Labo1p5 pour l'ESR

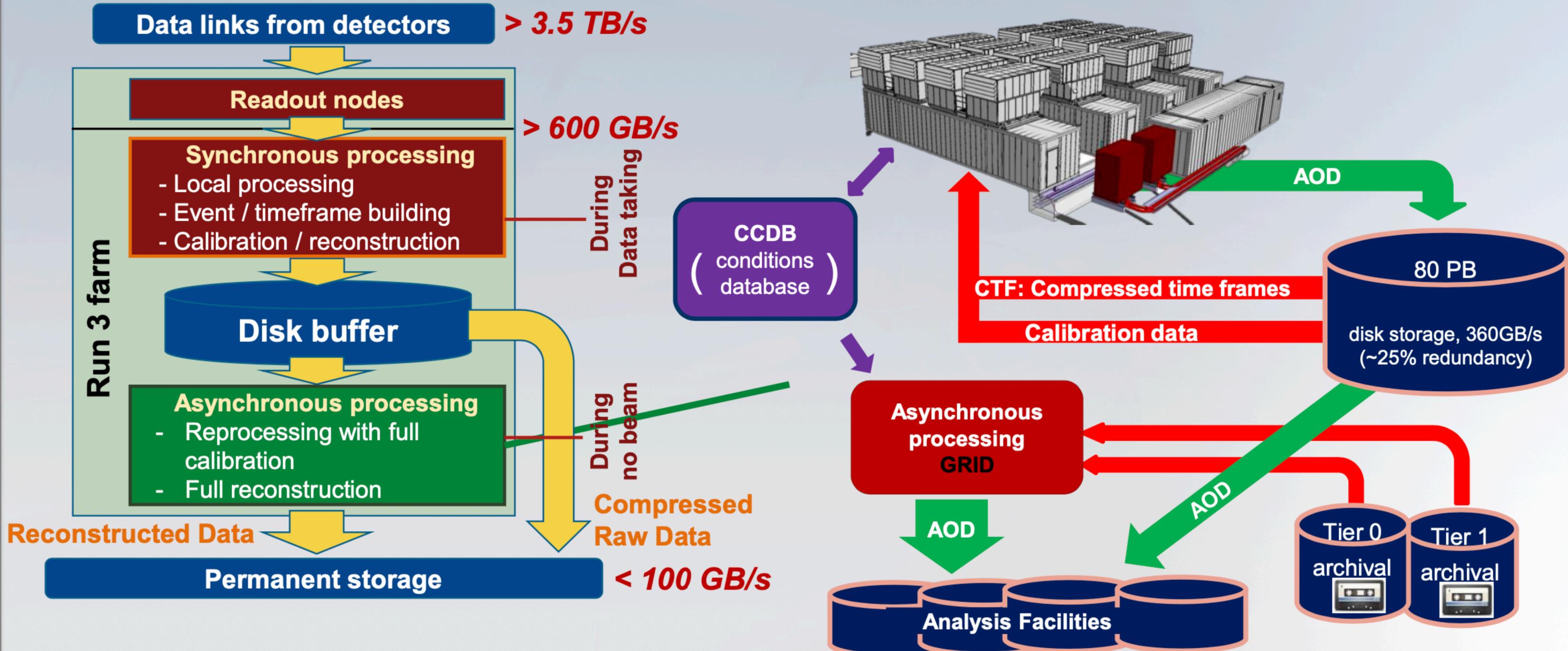
- Estimer l'empreinte de la recherche sur l'environnement
- La réduire (transition 1p5)
- Des chercheurs/ITA de l'in2p3/CEA en font partie
- Objectifs ESR : BGES de -4.7% / an (-50% en 2030, base 1990) à -2% / an

Résumé du cours

- Les expériences d'ions lourds ultra-relativistes ont principalement lieu au SPS, RHIC et LHC :
 - Au LHC le milieu formé est plus dense, plus grand et a un temps de vie plus long.
 - Les expériences actuelles au RHIC et LHC sont des expériences plus généralistes que les expériences passées du SPS.
- L'expérience ALICE au LHC est dédiée à l'étude du QGP :
 - ALICE est composée d'un ensemble de détecteurs permettant de reconstruire des collisions produisant jusque 8000 particules chargées
 - Le spectromètre à muons a pour objectif de mesurer les quarkonia en collisions pp, pPb et PbPb
 - Les chambres de trajectographie du spectromètre à muons ont été conçues pour obtenir une résolution de la masse invariante des dimuons de 100 MeV afin de pouvoir séparer la famille de $Y(nS)$

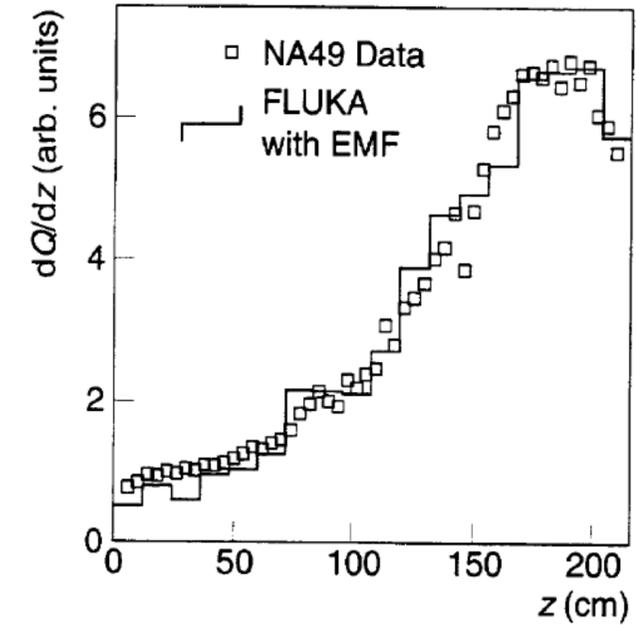
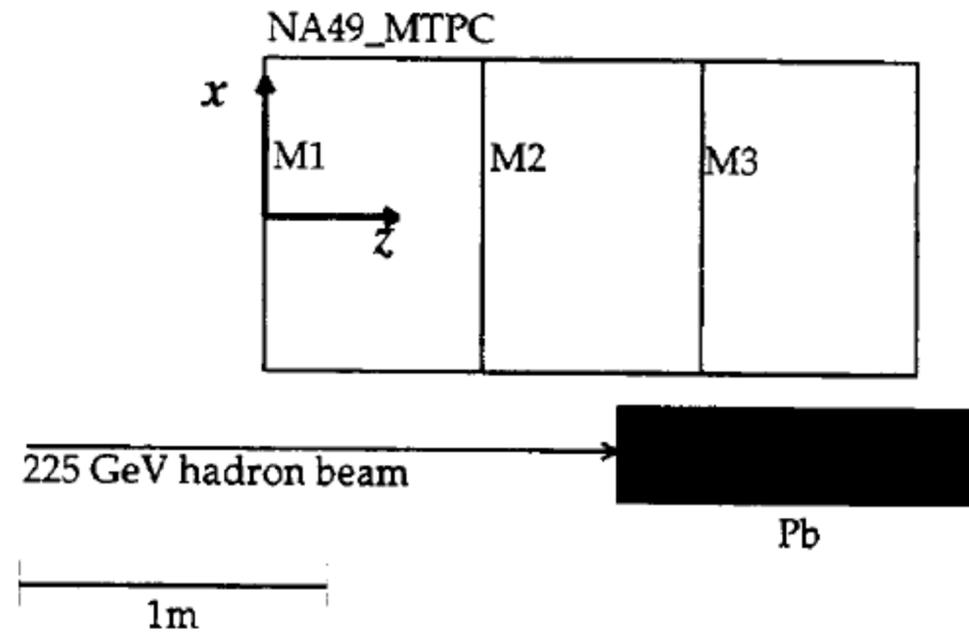
Backup

Synchronous and Asynchronous Processing



Etude de l'effet de l'absorbeur frontal sur la TPC

Test de l'effet de l'absorbeur frontal sur la TPC de NA49/SPS



Dispositif expérimental de la première étude du punch-through latéral de l'absorbeur à petit angle

... et comparaison des résultats expérimentaux avec les simulations GEANT et FLUKA

