

Accélérateurs de particules, CERN & LHC

5-6 février 2017, Formation PAF
académie de Reims, Troyes

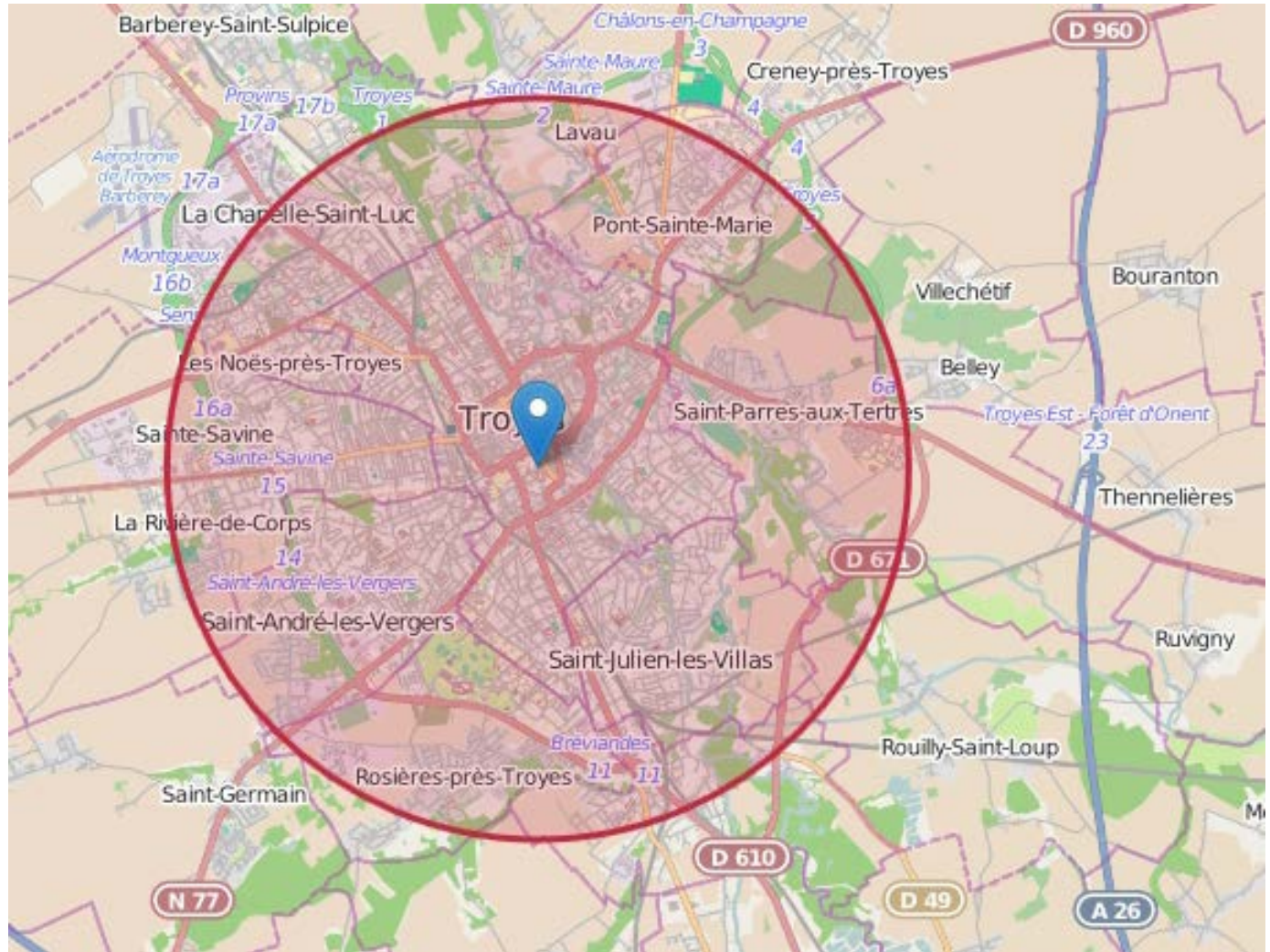
Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3 & Université Paris-Sud)
European Gravitation Observatory (CNRS & INFN Consortium)



Sommaire

- Accélérateurs
- Le CERN
- Le LHC
- Le futur du LHC



Si le LHC était installé à Troyes ...

Accélérateurs

L'électron-volt et ses multiples

L'électron-volt

L'électron-volt (noté eV) est l'énergie acquise par une particule de charge élémentaire soumise à une différence de potentiel de 1 volt. C'est une unité très petite ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule) mais dont les multiples sont bien adaptés à l'infiniment petit.

1 000 eV : 1 kiloélectron-volt (symbole keV)

1 000 keV : 1 mégaélectron-volt (MeV)

1 000 MeV : 1 gigaélectron-volt (GeV)

1 000 GeV : 1 téraélectron-volt (TeV)

CNRS-IN2P3 / Bruno Mazoyer - LAL Orsay

Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires (α , β , γ)	1-10 MeV
Energie de masse d'un proton	1 GeV
Énergie de collision au LHC	7-14 TeV
Rayons cosmiques	1 MeV à 1000 TeV

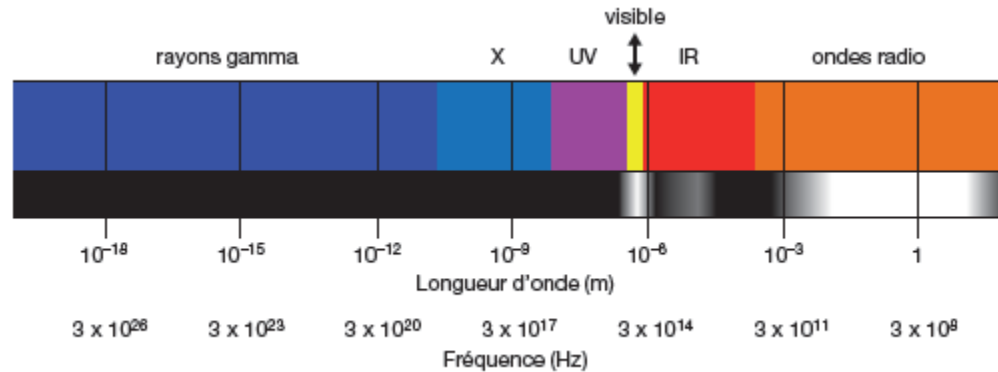
© Sébastien Descotes-Genon

Unités naturelles: Cte de Planck $\hbar =$ vitesse de la lumière $c = 1$:

$$\implies 1 \text{ eV} = 1 / (0.2 \mu\text{m}) = 10^{-36} \text{ kg} = 1 / (0.7 \text{ fs})$$

Les accélérateurs de particules

- Plus on veut sonder la matière aux petites échelles, plus il faut d'énergie
→ Exemple des ondes électromagnétiques : énergie $\propto 1 / (\text{longueur d'onde})$



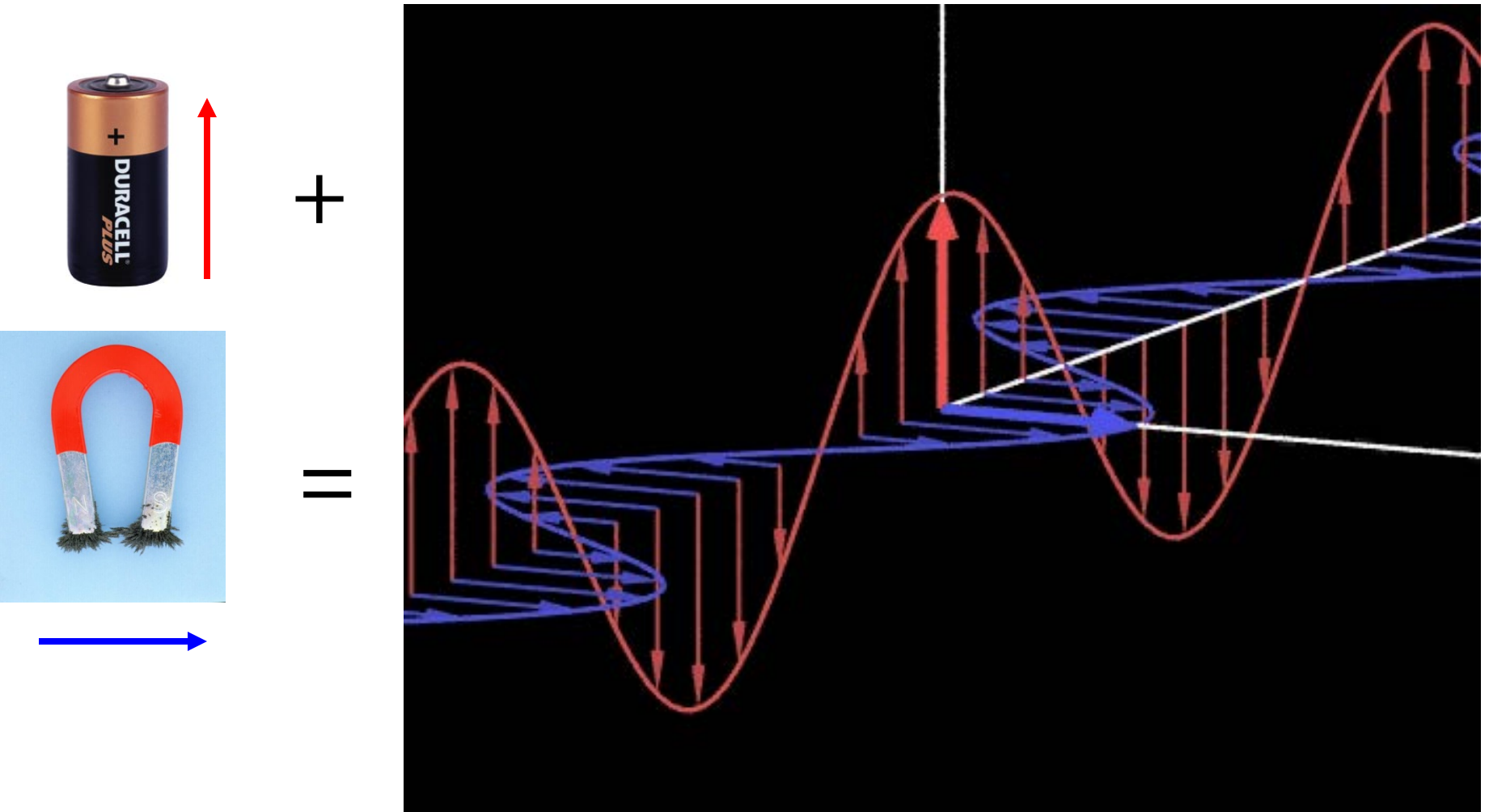
- La plupart des particules sont instables \Rightarrow elles n'existent pas dans la Nature
→ Il faut les produire artificiellement
→ En grande quantité pour obtenir des mesures de qualité
→ Les accélérer pour leur donner l'énergie souhaitée
→ Les amener/créer au cœur des détecteurs construits spécialement pour les étudier

• Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$
$$E = mc^2$$

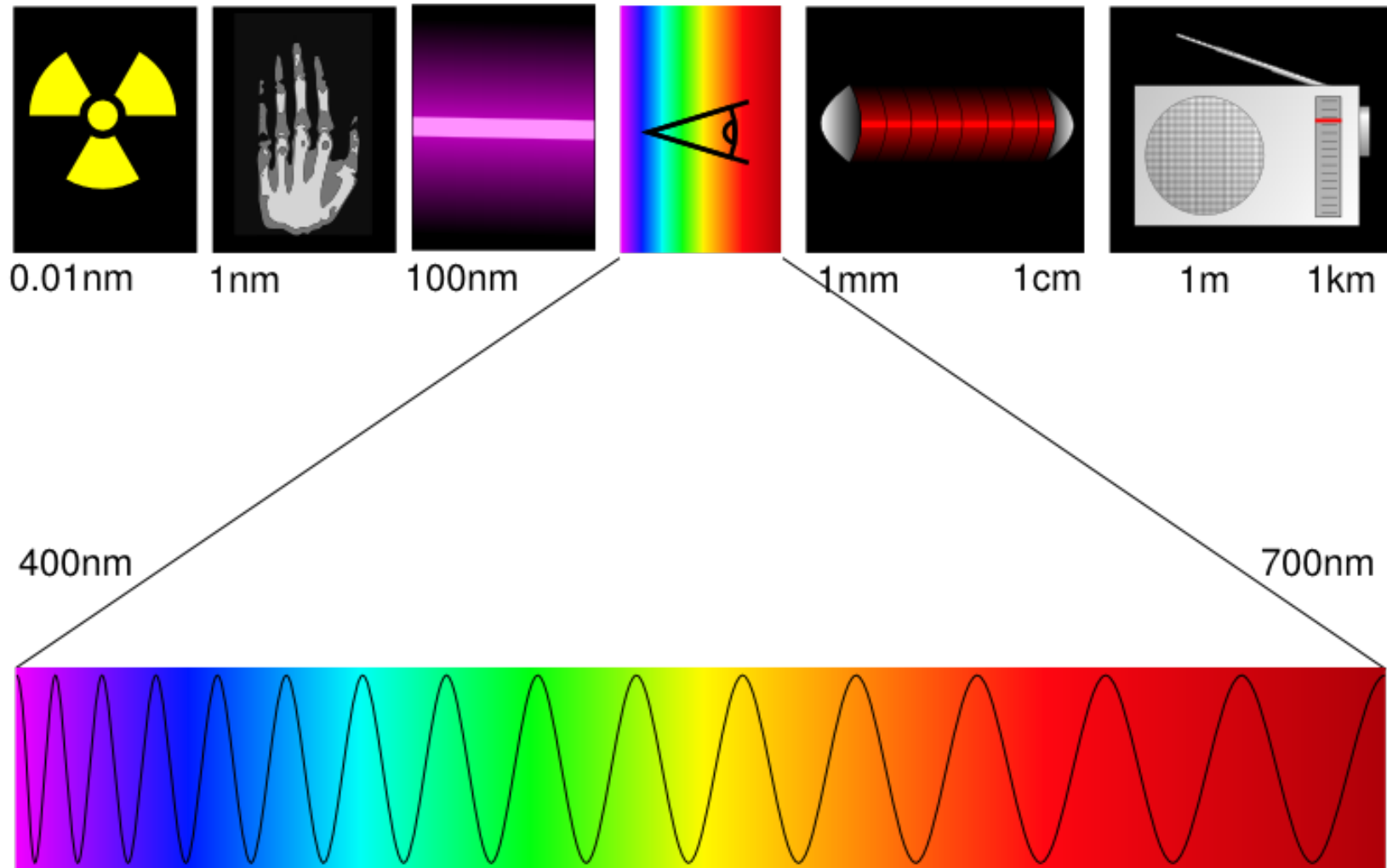
Ondes électromagnétiques



- Champ électrique
- Champ magnétique

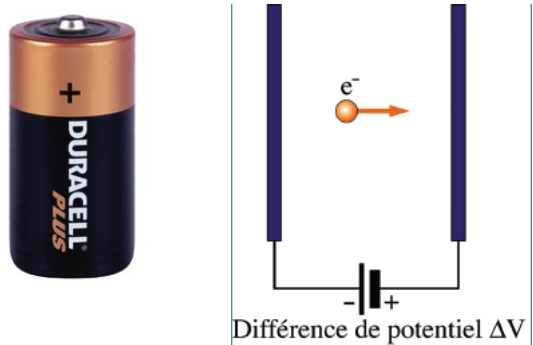
Spectre électromagnétique

- Des rayons gamma énergétiques aux ondes radio

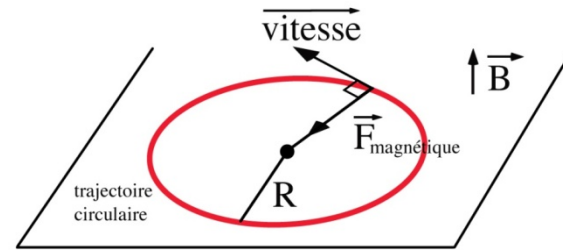


Les accélérateurs de particules

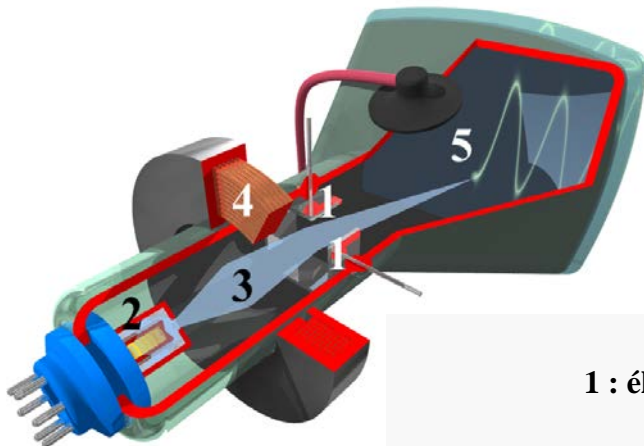
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



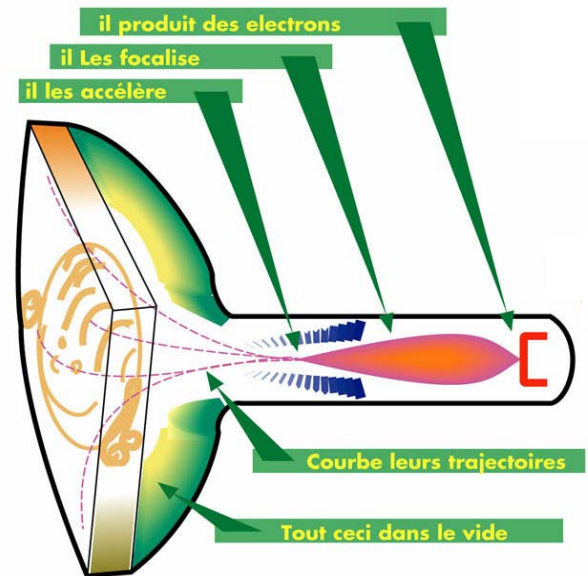
- On les pilote avec des champs magnétiques



→ Les oscilloscopes et les tubes TV cathodiques sont des accélérateurs !

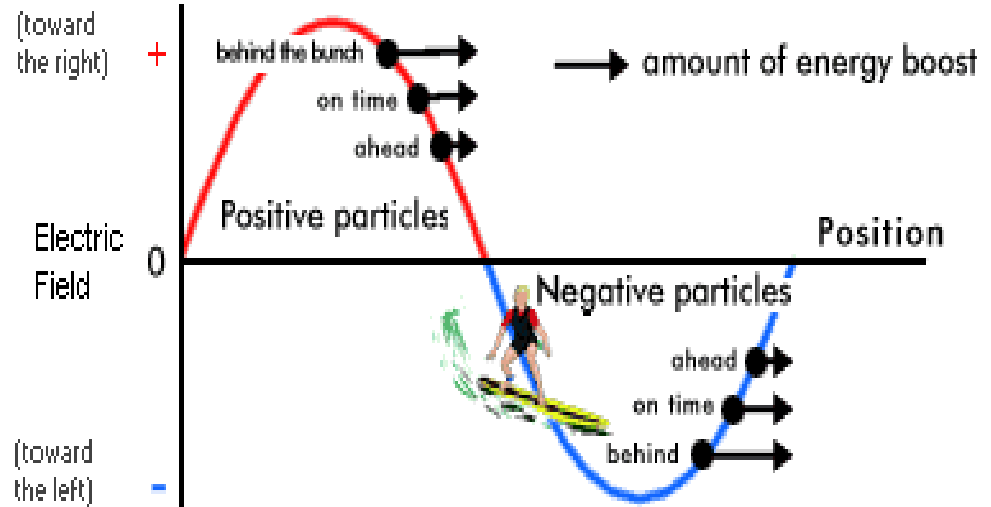
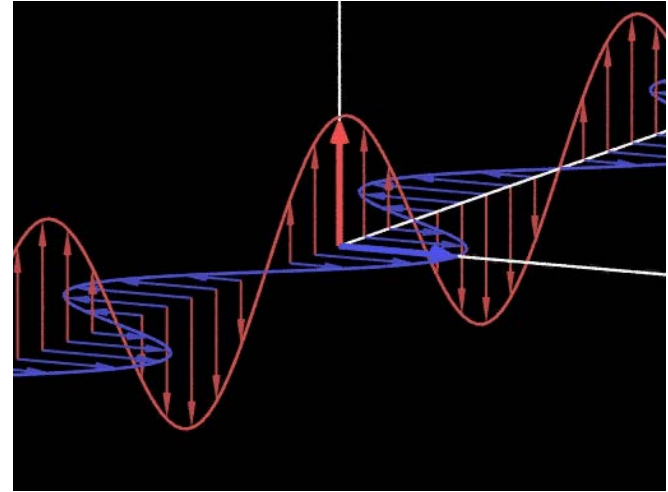


Tube d'oscilloscope
1 : électrodes dévient le faisceau
2 : canon à électrons
3 : faisceaux d'électrons
4 : bobine pour faire converger le faisceau
5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore



Accélération de particules chargées

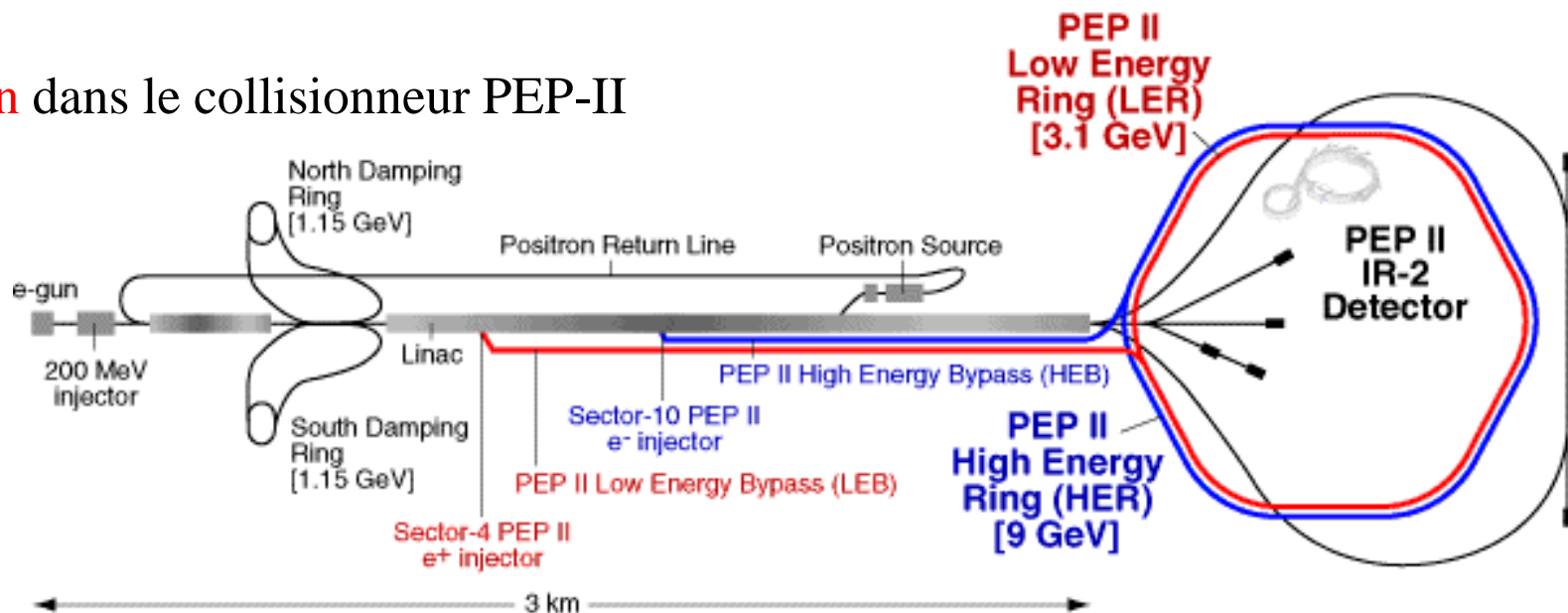
- Les particules « surfent » sur une onde électromagnétique de très haute fréquence (~400 MHz)



L'accélérateur linéaire de SLAC
(Californie) : 2 miles (3,2 km) de long

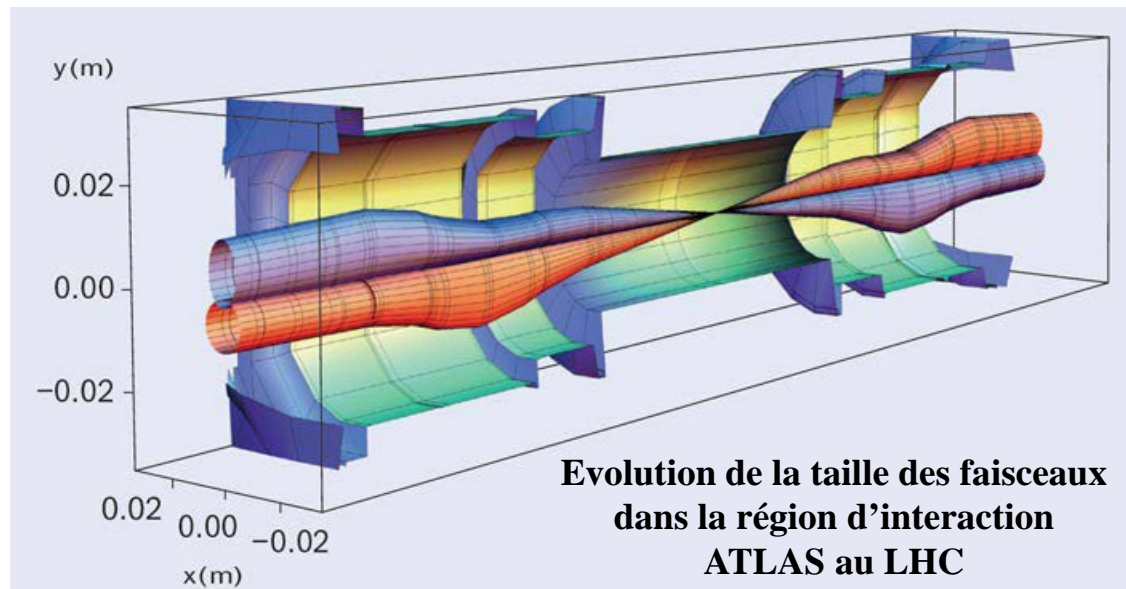
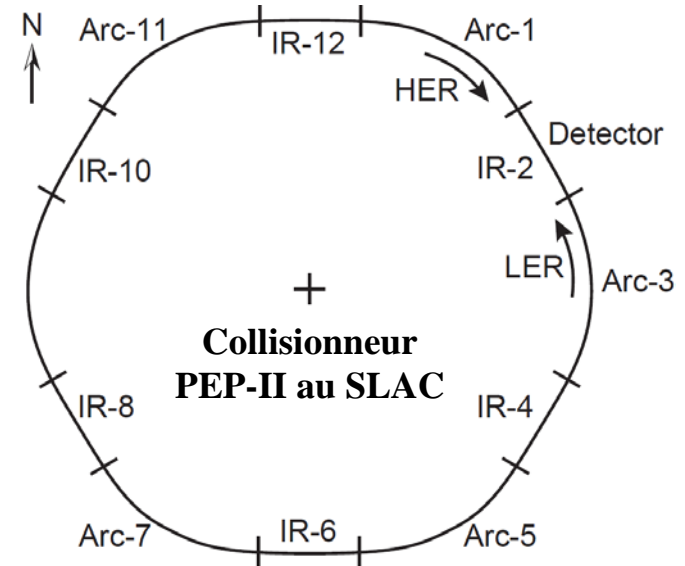
Un exemple d'accélérateur linéaire (SLAC)

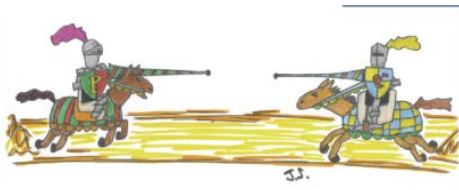
- **Electrons** produits par chauffage d'une cathode
- **Positrons** produits par collision d'un faisceau d'électrons de 20 GeV sur une cible fixe
- Mise en **paquets** des deux faisceaux, injection dans le LINAC, puis **mise en forme** dans des « anneaux d'amortissement »
- **Accélération** par onde électromagnétique très haute fréquence
 - Les particules quittent le LINAC une fois leur énergie nominale atteinte



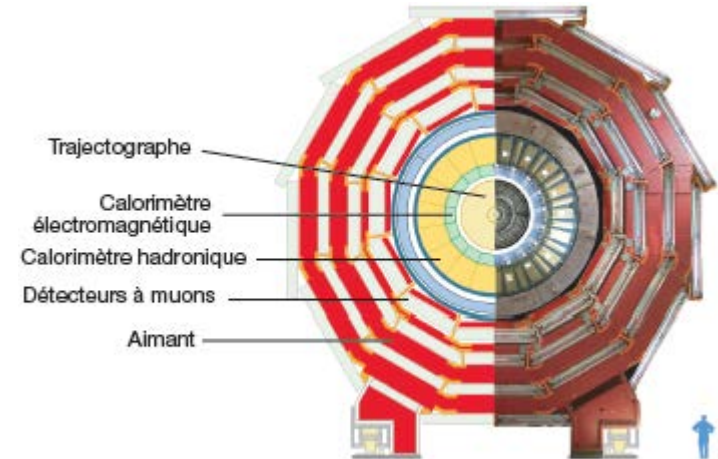
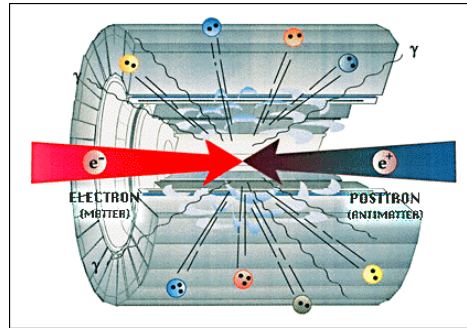
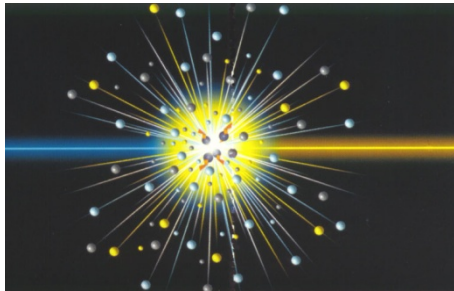
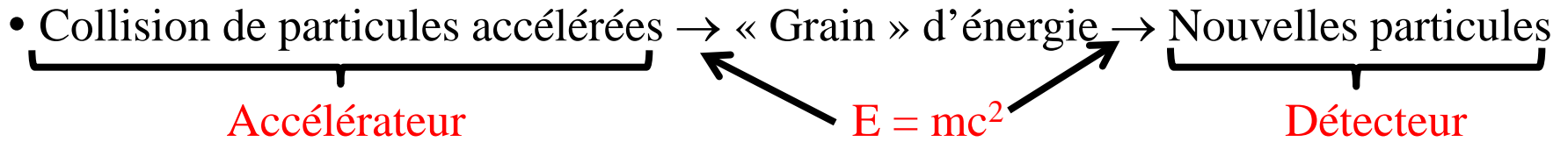
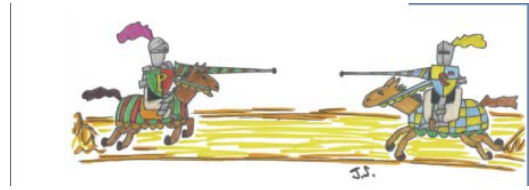
Pilotage des particules chargées

- Dipôles pour courber les trajectoires des particules
 - Maintien sur une orbite (quasi-)circulaire
 - Alternance de sections droites (accélération) et d'arcs de cercle (lumière synchrotron)
- Actions sur la forme du faisceau :
 - Quadrupoles, sextupoles, etc.
 - Taille transverse (minimale au point de collision)
- Taille transverse du faisceau
 - $\sigma^2 \propto \varepsilon \times \beta$
 - **Emittance** ε
 - « Qualité du faisceau »
 - **Fonction d'amplitude** β
 - Configuration des aimants

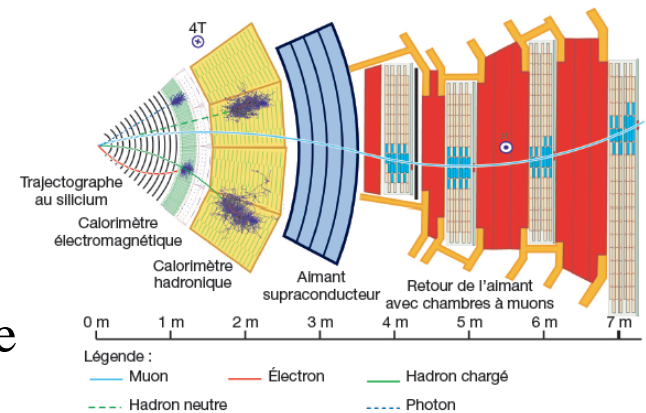




Les collisionneurs



- Accélération dans des sections droites
- Collisions dans des anneaux circulaires
 - Taille de la machine « réduite »
 - Particules produisent des collisions à chaque tour
 - Les collisions « frontales » permettent d'utiliser au mieux l'énergie disponible
- Précision d'horlogerie au-milieu d'une grosse machine
 - Taille de la zone de collision : ~ **cm** (plutôt moins)
 - Taille de l'accélérateur : ~ **km** (plutôt plus)



Intermède gourmand ...



Sections efficaces et luminosité

- Formule fondamentale : $R = \sigma \mathcal{L}$
 - R : taux d'occurrence d'une réaction [Hz]
 - σ : section efficace du phénomène [cm^2]
 - \mathcal{L} : luminosité [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
- Caractéristique fondamentale de l'accélérateur

- Unité plus « usuelle » : le barn (b)

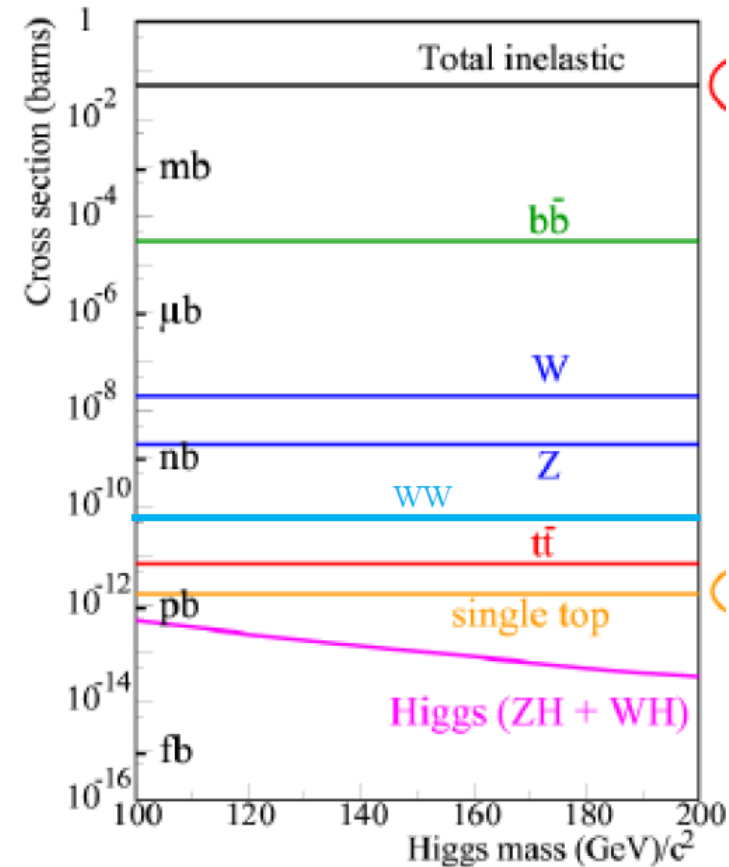
- 1 barn = $10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$
- mb, μb , nb, pb, fb

- On exprime la luminosité en $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ mais la luminosité intégrée en « {m,μ,n,p,f}b inverse »

- Prise de données : $\sim 10^7 \text{ s / an}$
- Attention : plus le préfixe est « petit », plus la luminosité intégrée est élevée : $1 \text{ fb}^{-1} = 1000 \text{ pb}^{-1}$

- Expression simplifiée de la luminosité

- f : fréquence de croisement
- n_1 et n_2 : nombres de particules par paquet
- $\sigma_x \sigma_y$: taille transverse des paquets – profil gaussien



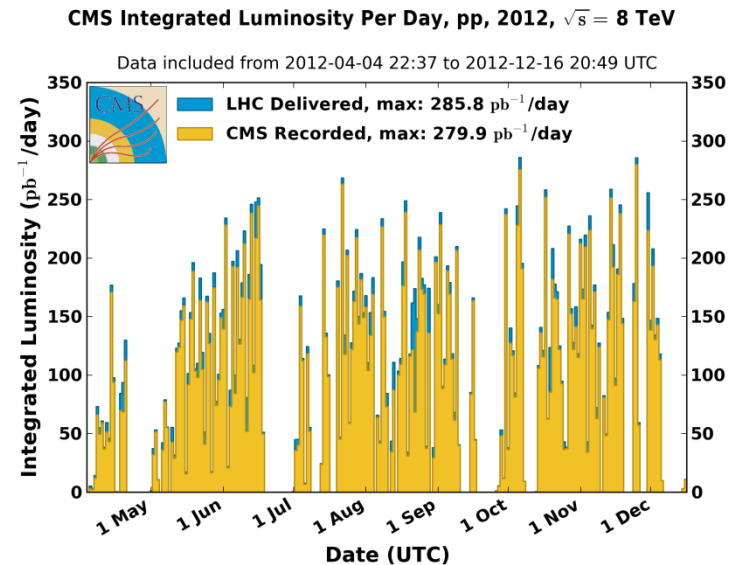
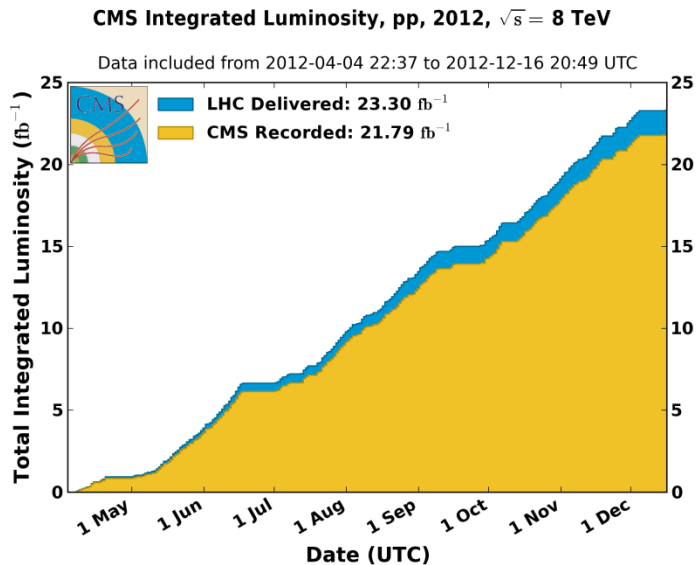
Ulrich Heintz - Moriond QCD

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

Exemple de performances d'un « couple » accélérateur-détecteur : LHC-CMS en 2012

- Evolution de la luminosité intégrée en fonction du temps

- Comparaison des luminosités délivrée par l'accélérateur et enregistrées par le détecteur

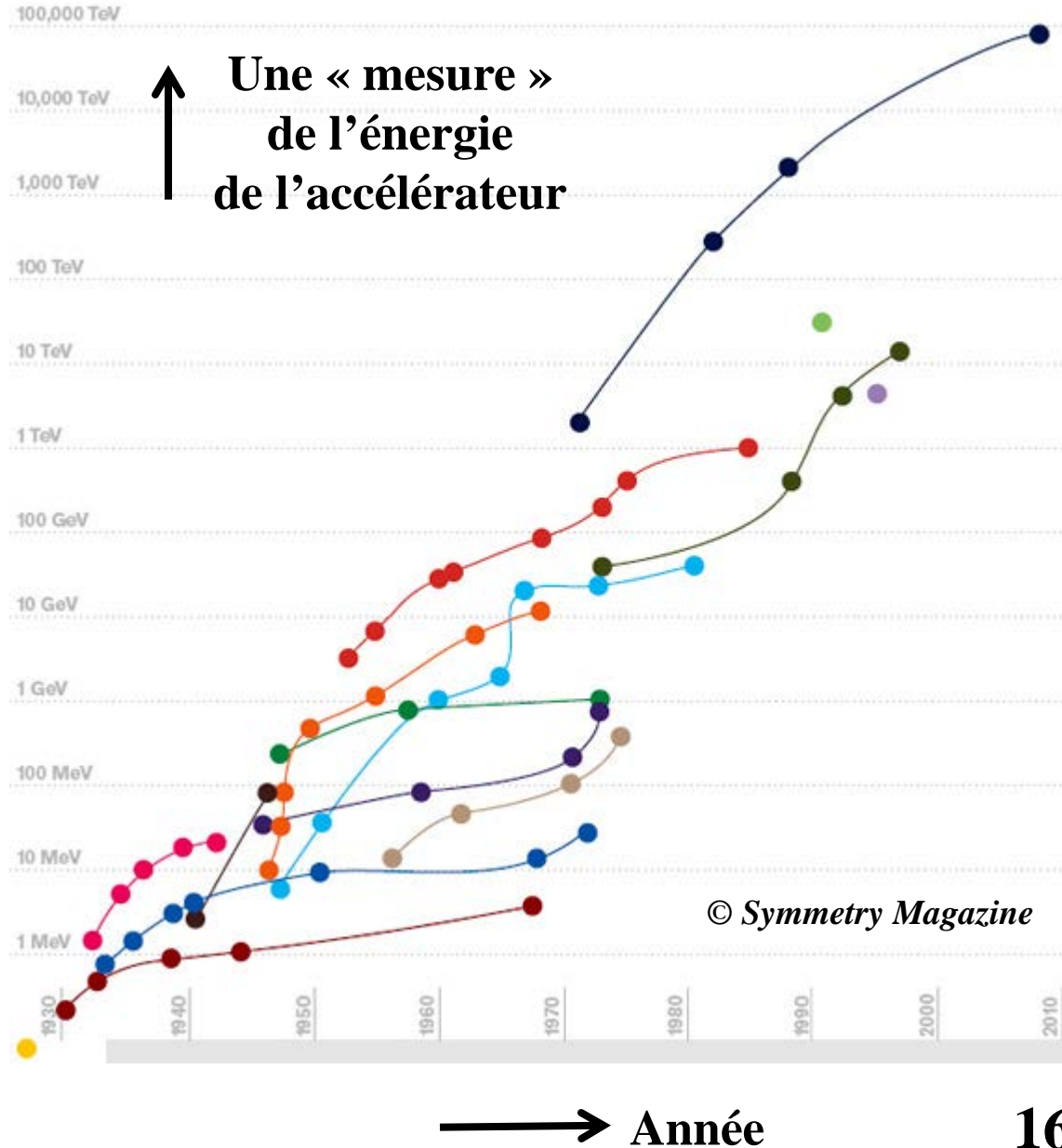
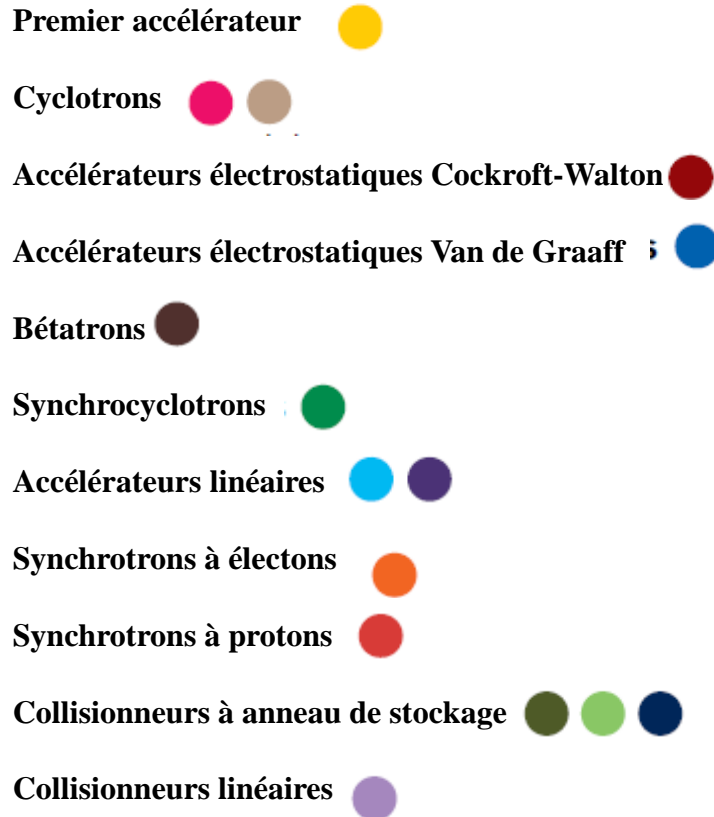


$$L_{\text{intégrée}} = 50 \text{ fb}^{-1} \left(\frac{L_{\text{instantanée}}}{5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}} \right) \left(\frac{\text{Temps de prise de données}}{10^7 \text{ s}} \right)$$

Année calendaire $\approx 3,16 \times 10^7$ s ; « cycle utile » du LHC en 2012 : 36,5%

Progrès des accélérateurs

- Diagramme de Livingston



Progrès des accélérateurs

First accelerator ●

Most accelerators in operation today, including thousands of machines used for treating the surfaces of materials, apply the same principle of resonance acceleration that Norwegian engineer Rolf Widerøe explored when he built the world's first accelerator in Aachen, Germany in 1928. His linear accelerator, or linac, powered by an alternating voltage, propelled potassium ions through an 88-cm-long glass tube, achieving an energy gain equivalent to twice the peak voltage he used. This proof of principle opened the door to a vast new field of research and many types of accelerators.

Cyclotrons ●●

More than 350 cyclotrons around the world produce radioactive isotopes for medical applications, such as PET scans. Inspired by Widerøe's success, Ernest Lawrence and his student M. Stanley Livingston built the first of these circular accelerators, about four inches in diameter, and operated it in 1931 in Berkeley. **(A)** The cyclotron's magnetic field forces particles to travel in spirals. On each turn, the particles cross an electric field, which accelerates them to higher energy.

Cockcroft-Walton electrostatic accelerators ●

In 1932, John Cockcroft and Ernest Walton became the first scientists to split the atomic nucleus with artificially accelerated particles when they aimed a proton beam from a new type of accelerator at the nuclei of lithium atoms. Physicists still use Cockcroft-Walton accelerators to deliver strong, steady streams of low-energy protons. The machines can turn alternating currents into electrostatic fields corresponding to more than one million volts.

Van de Graaff electrostatic accelerators ●

Scientists used this type of accelerator for several decades in physics and biomedical research. Commercial companies now build modern versions of this machine. Invented at Princeton University in the 1930s, the accelerator generates a high voltage by charging a large sphere through a moving belt. In the early 1950s, the Massachusetts Institute of Technology donated its Van de Graaff machine to the Museum of Science in Boston, where visitors can still see it in action.

Betatron ●

In 1940, Donald Kerst at the University of Illinois modified the design of the cyclotron to accelerate particles to higher energy. The betatron's large magnet provides a variable field and keeps particles on a circular orbit inside a beam pipe, a major step forward in accelerator technology. In 1957, Dr. O. Arthur Stenon opened in Wisconsin the first private medical center to treat cancer patients with a betatron. Because of cost and size limitations, demand for betatrons started to fall in the 1970s.

Synchrocyclotrons ●

For many years physicists struggled to build accelerators that work for both low- and high-speed particles. The problem is that slow particles gain energy and speed when traveling through an electric field while particles traveling close to the speed of light gain energy while barely speeding up at all, a phenomenon explained by the theory of special relativity. This creates a timing problem in accelerators with electric fields that alternate at constant frequency. The synchrocyclotron, invented in the 1940s but no longer built today, solved the problem by introducing an electric field with variable frequency, paving the way for even better accelerators.

Linear accelerators ●●

Physicists built the first modern linear accelerators after World War II, using microwave technology developed for radar. Today, thousands of hospitals use linacs for radiotherapy in cancer treatment. **(B)** Linacs use radio-frequency waves to create electric fields inside cylindrical cavities. Luis Alvarez built the first standing-wave linac to accelerate protons at the University of California, Berkeley, in 1946. William Hansen and his team at Stanford University constructed the first traveling-wave linac to accelerate electrons in 1947. High-energy accelerators often rely on a standing-wave linac to give heavy particles an initial boost before injecting them into the circular machines that accelerate them to high energy.

Electron synchrotrons ●

The operation of the first electron synchrotron in the United States, at General Electric in 1946, led to the discovery of synchrotron radiation, the light emitted by charged, high-energy particles traveling in a circle. Today, more than 50 synchrotrons, known as lightsources, **(C)** produce intense beams of light for research in material science, chemistry, molecular biology, and other fields. By injecting particles into a synchrotron at close to the speed of light, scientists can operate its alternating electric field at an almost constant frequency. An adjustable magnetic field guarantees that the particles stay on a fixed circular path, so beams can circulate for long periods of time.

Proton synchrotrons ●

Because protons are about 2000 times heavier than electrons, they must be accelerated to higher energies, and hence over longer distances, to attain relativistic speeds. The discovery in the 1950s of strong beam focusing, which controls the size of a particle beam through a series of magnets, allowed the construction of large, circular proton accelerators for nuclear and high-energy research, starting at Brookhaven National Laboratory and the European laboratory CERN. Hospitals have begun to use proton synchrotrons for cancer treatment.

Storage ring colliders ●●●

Particle colliders have led to the discoveries of many subatomic building blocks and the forces that govern their behavior. Storage ring colliders are based on synchrotron technology. They accelerate two beams of particles in opposite directions and circulate them for hours. Every time the beams cross, a few particles collide. In the 1960s, scientists built the first electron-positron collider at Frascati, Italy, followed by machines in the United States and Russia. Today, colliders at KEK, Fermilab, Brookhaven—and, soon, CERN **(D)**—smash electrons, positrons, protons, antiprotons, and ions into each other. Scientists now are developing the technology for a proposed muon collider.

Linear colliders ●

The Stanford Linear Accelerator Center started operating the world's first linear particle collider in 1989. Today, a worldwide collaboration of scientists is advancing plans for the proposed International Linear Collider, which would use superconducting radio-frequency (RF) cavities to accelerate electrons and positrons to much higher energy than achieved at SLAC. A collaboration based at CERN is developing a new linac concept, the Compact Linear Collider.

Text: Kurt Riesselmann

Image: Adapted from the 2001 Snowmass Accelerator R&D Report

Le CERN

La genèse du CERN

- 1949 : idées de **coopération scientifique à l'échelle européenne**
 - **Réconciliation par la science** après la seconde guerre mondiale
- **Dans quel domaine ?**
 - Physique nucléaire ↔ enjeux militaires clairs
 - **Physique des particules** : domaine de recherche fondamentale, « neutre »
- Louis de Broglie propose la **création d'un grand laboratoire européen**
- Février 1952 : mise en place du **Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire**
- 1^{er} juillet 1953 : signature, au siège de l'Unesco, de la convention donnant naissance au CERN
- 17 mai 1954 : démarrage des travaux à Meyrin
- **29 septembre 1954 : création de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire**
 - Acronyme conservé (car déjà habituel) : **CERN**



Ils ont été à l'origine du CERN en France



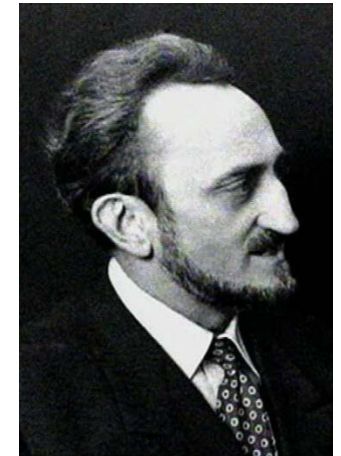
Raoul Dautry
(1880-1951)
Ingénieur et
homme politique



Lew Kowarski
(1907-1979)



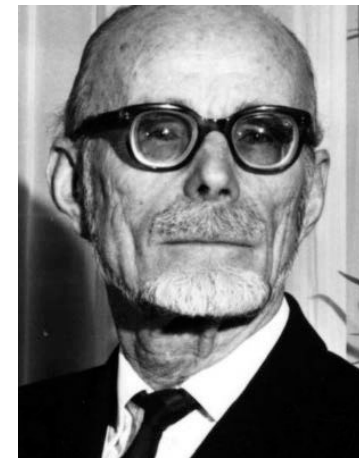
Louis de Broglie
(1892-1987)



Francis Perrin
(1901-1992)



François de Rose
(1910-2014)
Diplomate



Pierre Auger
(1899-1993)

Le CERN, vu par lui-même

- <http://home.web.cern.ch/fr/about>

Le CERN en bref

Comment l'univers a-t-il commencé? Les physiciens du CERN cherchent des réponses, en utilisant les accélérateurs de particules les plus puissants.

Le CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des constituants et des lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques très complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière : les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la Nature.

Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent le résultat de ces collisions.

Fondé en 1954, le CERN est situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève. Il a été l'une des premières organisations à l'échelle européenne et compte aujourd'hui vingt et un États membres.



Le CERN, vu par lui-même

- <http://home.web.cern.ch/fr/about>

Le nom

Le CERN est aujourd'hui l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire. » À l'origine, l'acronyme correspondait à « Conseil européen pour la Recherche nucléaire », un organe provisoire institué en 1952, qui avait pour mandat de créer en Europe une organisation de rang mondial pour la recherche en physique fondamentale. » À l'époque, la recherche en physique fondamentale avait pour principal objectif la compréhension de l'intérieur de l'atome, c'est-à-dire du noyau, d'où l'emploi du qualificatif « nucléaire ».

Lorsque le Laboratoire vit officiellement le jour, en 1954, le Conseil provisoire fut dissous et la nouvelle organisation fut baptisée Organisation européenne pour la Recherche nucléaire. L'acronyme CERN fut toutefois conservé.

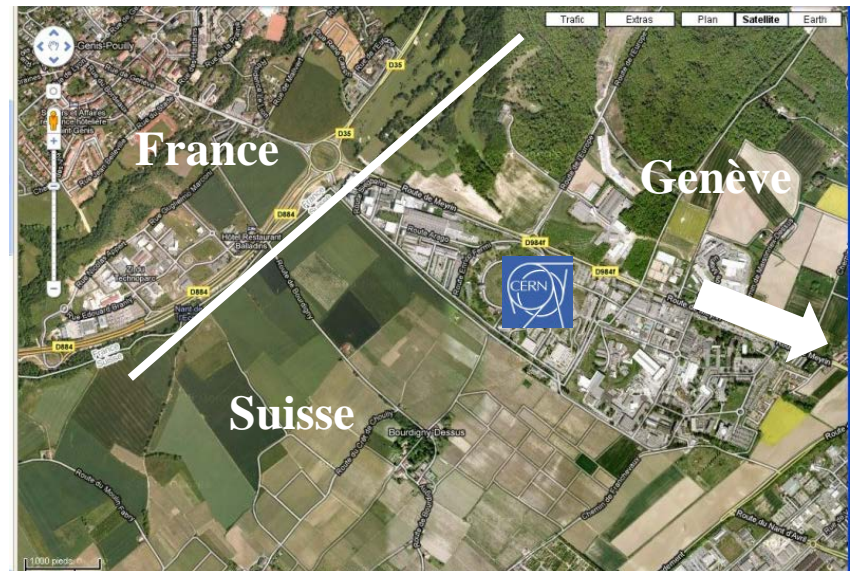
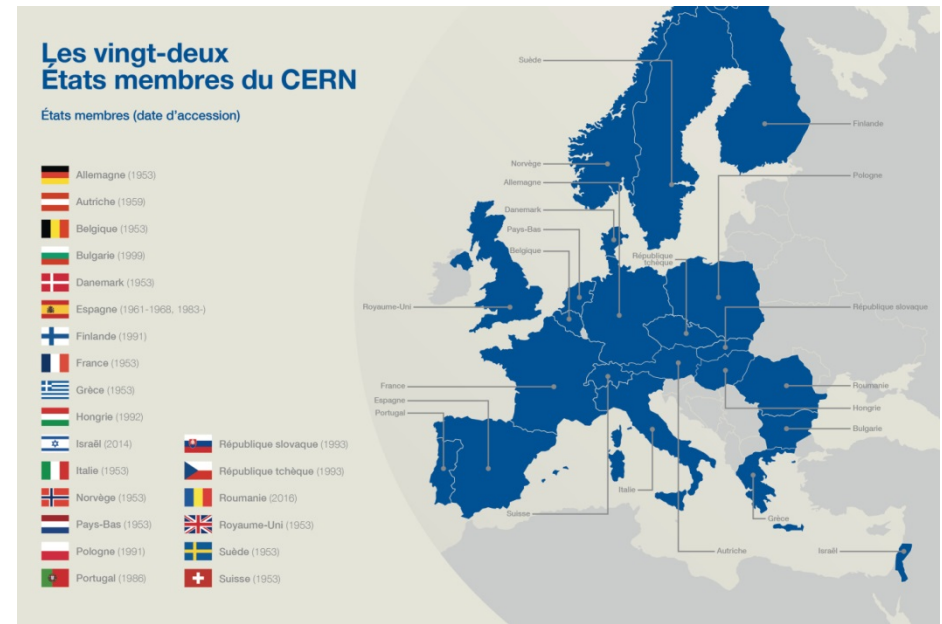
Aujourd'hui, notre compréhension de la matière va au-delà du noyau, et le principal domaine de recherche du CERN est la physique des particules, à savoir l'étude des composants fondamentaux de la matière ainsi que des forces auxquelles ils sont soumis. C'est pourquoi le CERN est souvent appelé « Laboratoire européen pour la physique des particules ».

Le CERN se consacre à la recherche scientifique fondamentale. C'est d'ailleurs ce qui ressort de sa Convention constitutive :

« L'Organisation assure la collaboration entre les États européens pour les recherches nucléaires de caractère purement scientifique et fondamental, ainsi que pour d'autres recherches en rapport essentiel avec celles-ci. L'Organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou de toute autre façon rendus généralement accessibles. »

Le CERN

- **Plus grand laboratoire de physique des particules au monde :**
 - ~ 2500 personnes y sont employées
 - ~ 10000 scientifiques visiteurs / an
 - ~ 1000 stagiaires
- Créé le 29 septembre 1954
 - France : un des douze états fondateurs
- 22 états membres
 - + pays « observateurs »
ou « participants »
- Le CERN est situé près de Genève, à cheval sur la frontière franco-suisse
- Le web a été inventé au CERN au début des années 1990 !



<http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html>



The screenshot shows a web browser window with the title "The World Wide Web project". The address bar contains the URL "http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html". The page content includes a navigation menu with links like "Fichier", "Edition", "Affichage", "Historique", "Marque-pages", and "Outils". The main heading is "World Wide Web". Below it, a paragraph explains that the WWW is a wide-area hypermedia information retrieval initiative. A list of links follows, including "executive summary", "Mailing lists", "Policy", "W3 news", and "Frequently Asked Questions". Further down, there are sections for "What's out there?", "Help", "Software Products", "Technical", "Bibliography", "People", "History", "How can I help?", and "Getting code".

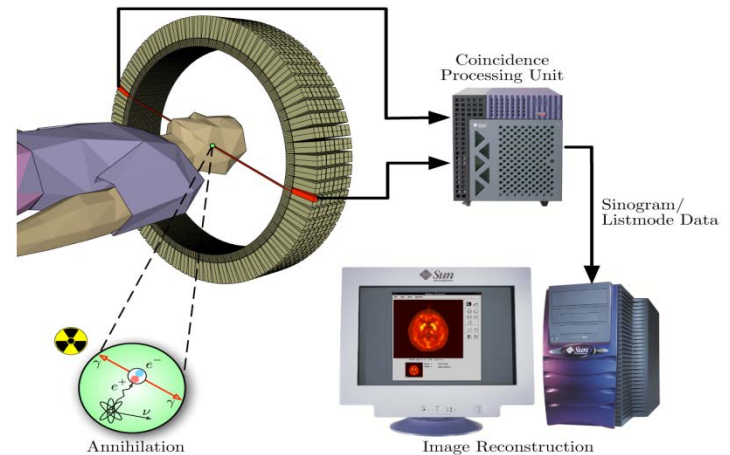
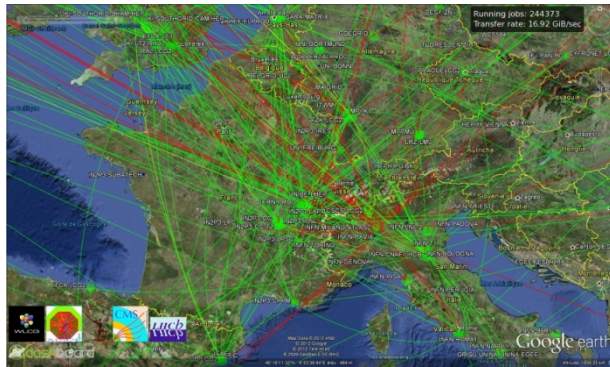
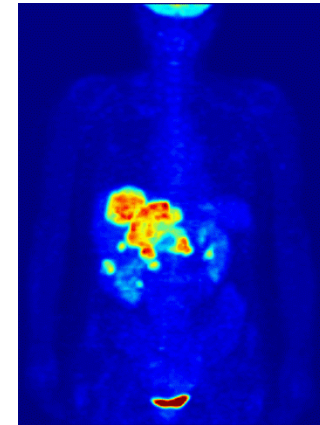
La première page web au monde !

[En fait la version de 1992. La toute première]
[version (1990) est considérée comme *perdue*.]
[Si quelqu'un a une sauvegarde ... ☺]



Retombées de la physique des particules

- Web
- La « Grille de calcul »
- L'imagerie médicale
- La radiothérapie



- Des développements technologiques variés
 - Chaque nouvelle expérience recule les limites de la technique
- L'industrie française bénéficie du fait que la France est un état frontalier du CERN

60 ans de CERN en images

- 1957 :le premier accélérateur, le **SynchroCyclotron (SC)**
- En fonctionnement jusqu'en 1990 ; se visite aujourd'hui



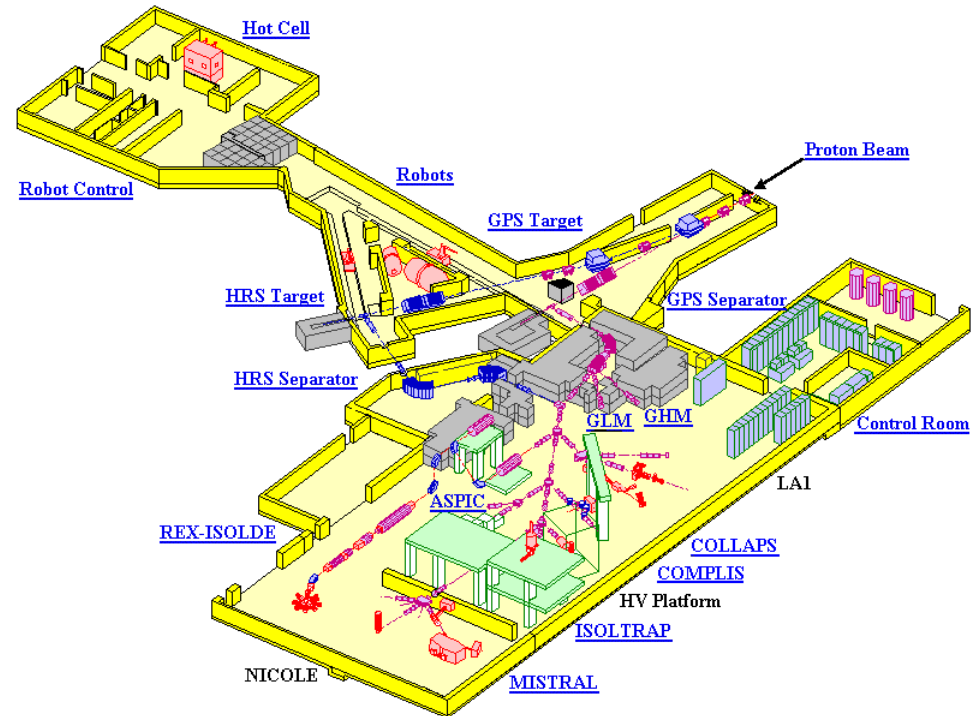
60 ans de CERN en images

- 1960: mise en service du **Synchrotron à Protons (PS)**
 - L'accélérateur de l'époque le plus puissant au monde
- Toujours en fonctionnement aujourd'hui.
 - Faisceaux mille fois plus denses qu'à ses débuts
 - Notamment injectés dans le LHC



60 ans de CERN en images

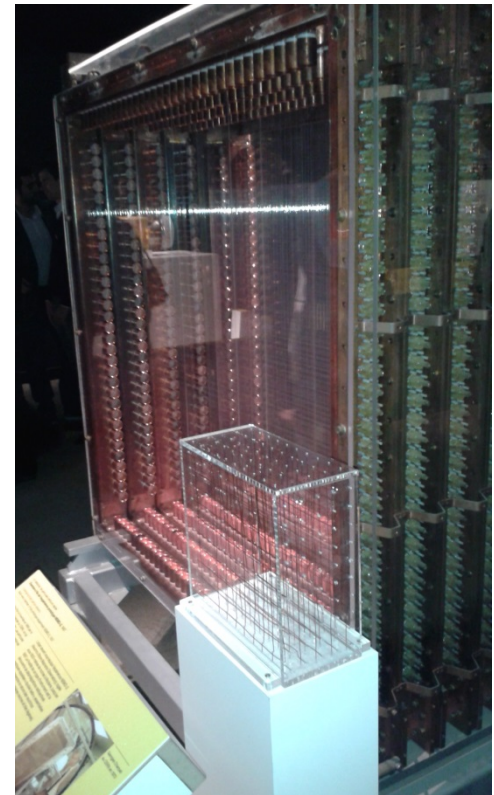
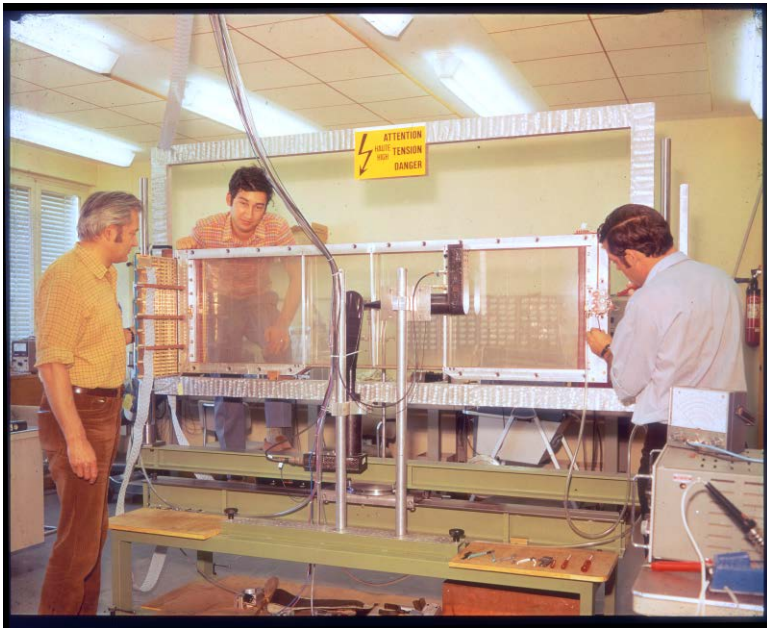
- L'installation **Isolde** (Isotope Separator On Line Device) produit depuis 1967 des noyaux atomiques instables.
- Domaines d'applications : physique nucléaire, médecine et électronique



60 ans de CERN en images

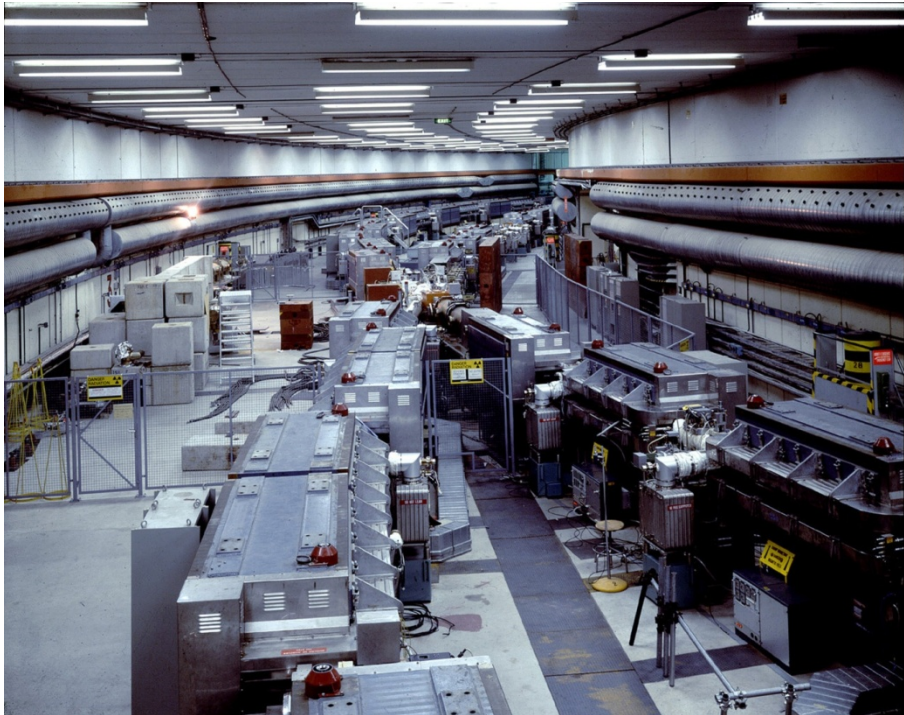
- 1968 : **Georges Charpak**, prix Nobel de physique 1992, invente la **chambre proportionnelle multifils**
- Ce détecteur, sans temps mort et lu directement par électronique, permet de gagner d'un seul coup un facteur 1000 sur le nombre de traces enregistrées par rapport aux chambres à bulles.

→ Début de l'ère électronique + informatique



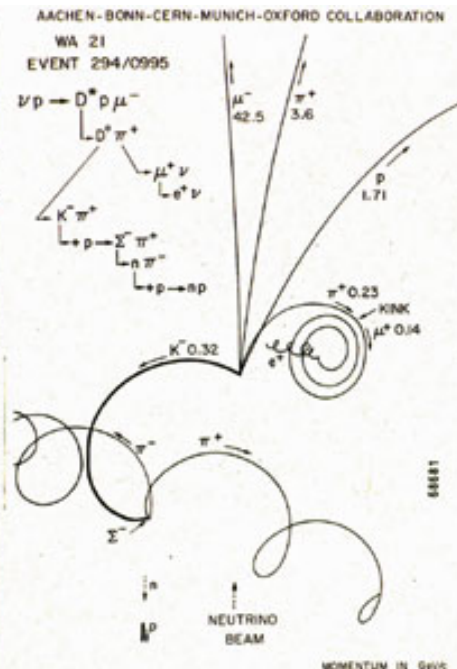
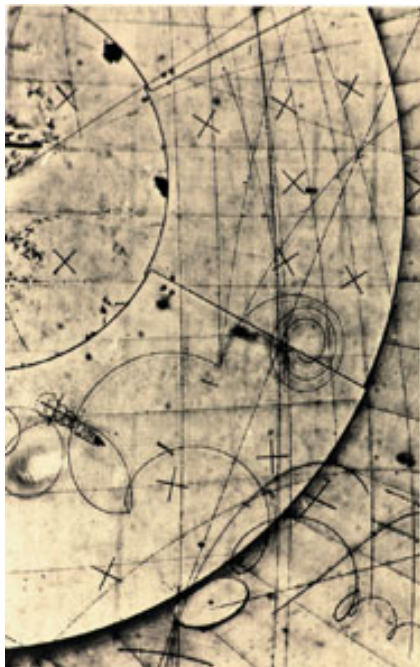
60 ans de CERN en images

- 1971 : **les Anneaux de Stockage à Intersections (ISR)**
 - Le premier collisionneur à protons au monde.
- Deux anneaux entrelacés de 300 m de diamètre.
- Ils se rencontrent en huit points et sont alimentés par le PS



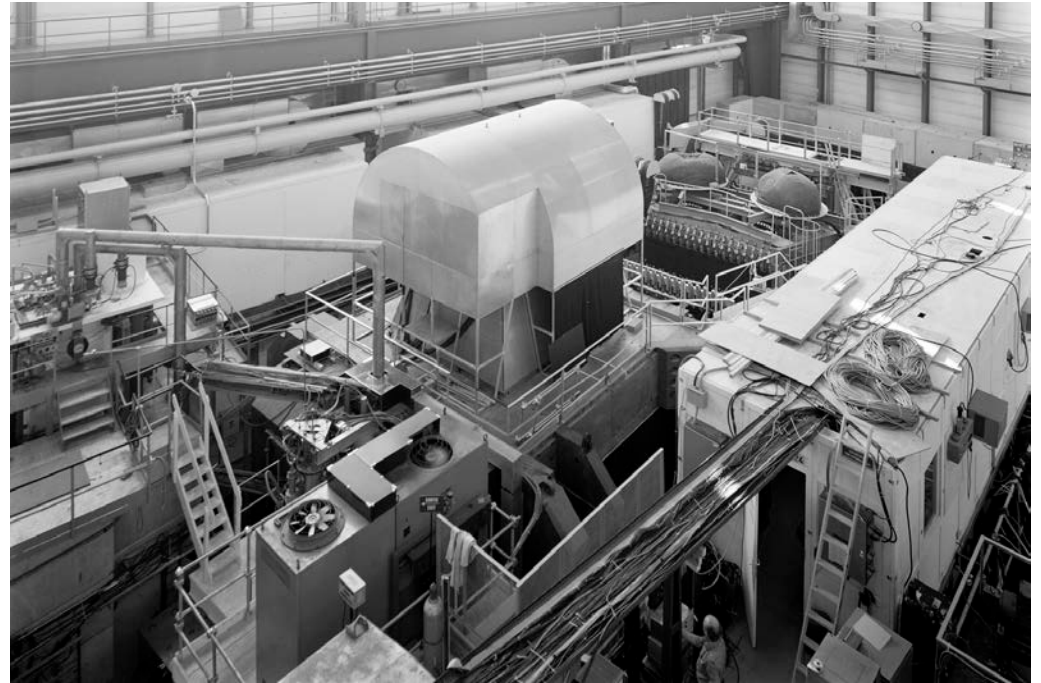
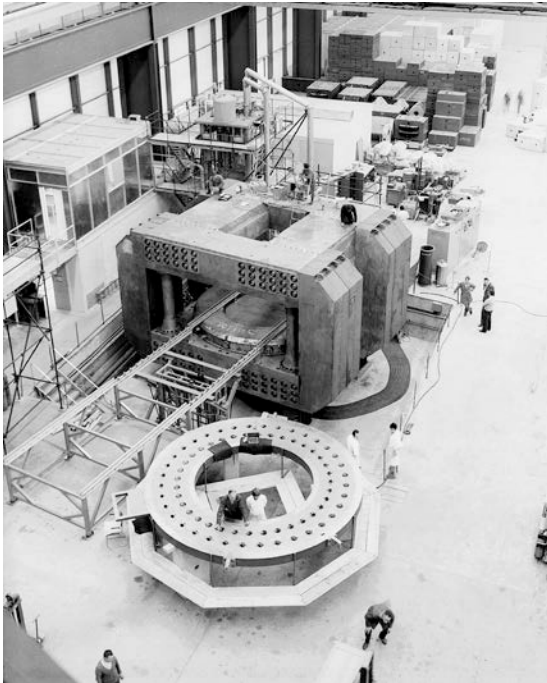
60 ans de CERN en images

- **La Grande Chambre à Bulles Européenne (BebC)**
 - Elle contient un grand volume d'hydrogène liquide maintenu dans un état proche de l'ébullition.
- Observation des trajectoires des particules, grâce aux bulles produites lors de leur passage dans l'hydrogène.



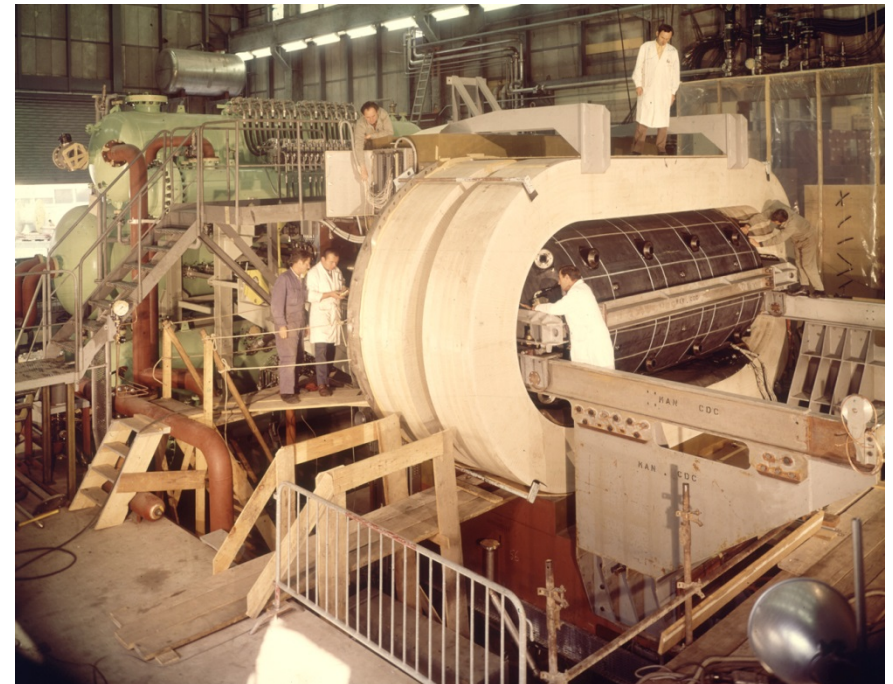
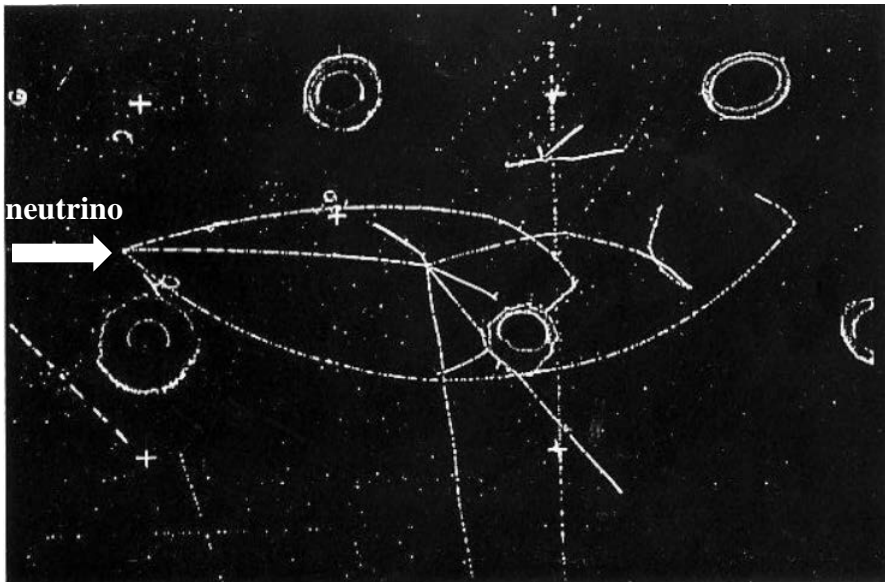
60 ans de CERN en images

- 1972 : mise en service du **spectromètre Omega**
 - Aimant supraconducteur de 15000 tonnes
- Chambres à étincelles remplacées par des chambres multifils proportionnelles
- Utilisé par 48 expériences jusqu'en 1996



60 ans de CERN en images

- La **chambre à bulles Gargamelle** détecte en 1973 les « courants neutres faibles »
 - Prédiction du Modèle Standard ainsi confirmé
- Phénomène très subtil :
3 événements sur plus d'1 million de clichés
 - Analysés à la main ...



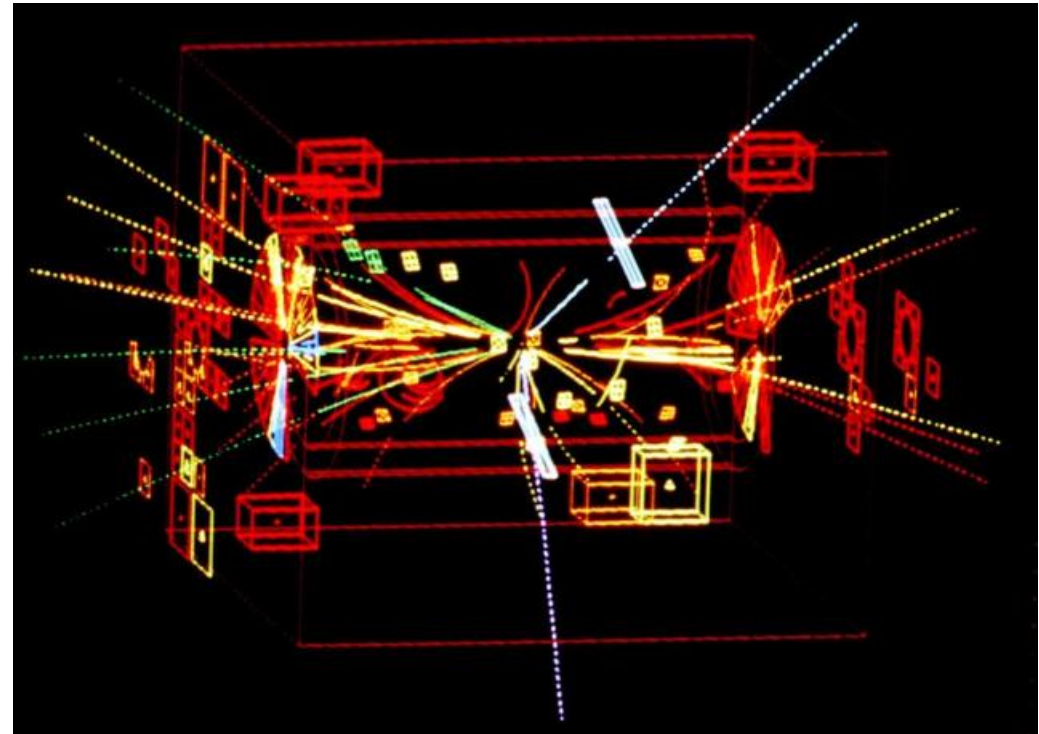
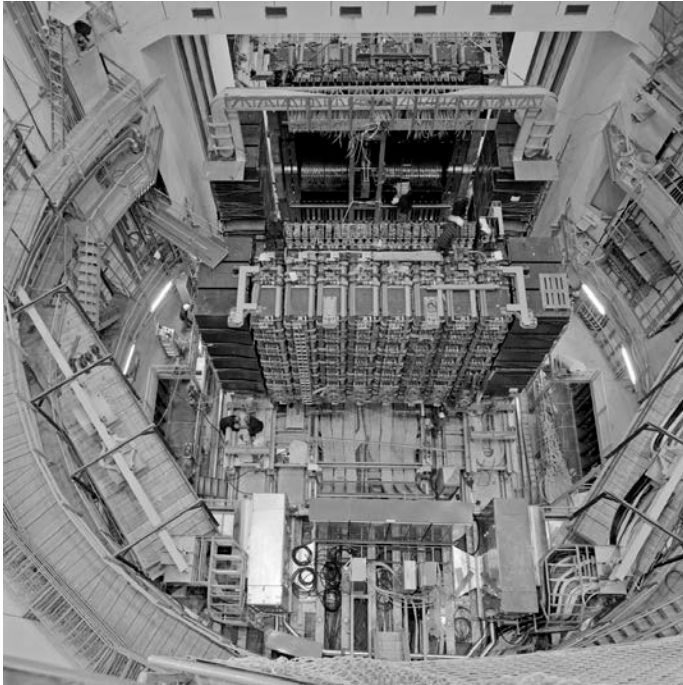
60 ans de CERN en images

- 1976 : le **Super Synchrotron à Protons (SPS)**, un tunnel de 7 km à 40 m sous terre, est le premier accélérateur transfrontalier du CERN
 - A cheval entre la France et la Suisse
- Il accélère aujourd'hui les faisceaux de protons avant leur injection dans le LHC.



60 ans de CERN en images

- 1983 : les détecteurs **UA1** (pour « Underground Area 1 », ici en photo) et **UA2** découvrent les bosons W et Z (les particules médiatrices de l'interaction faible) sur le collisionneur Sp \bar{p} S
 - Le boson Z véhicule les courants neutres mis en évidence par Gargamelle.



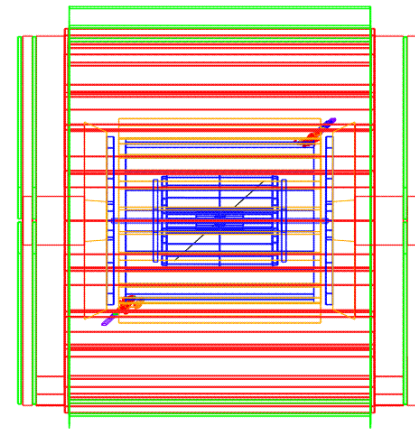
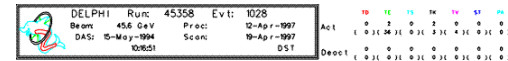
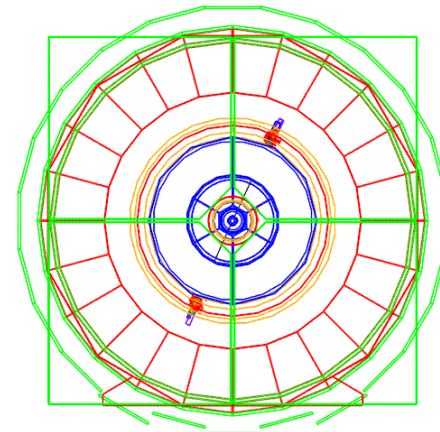
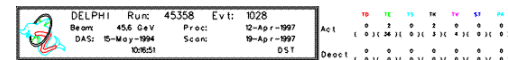
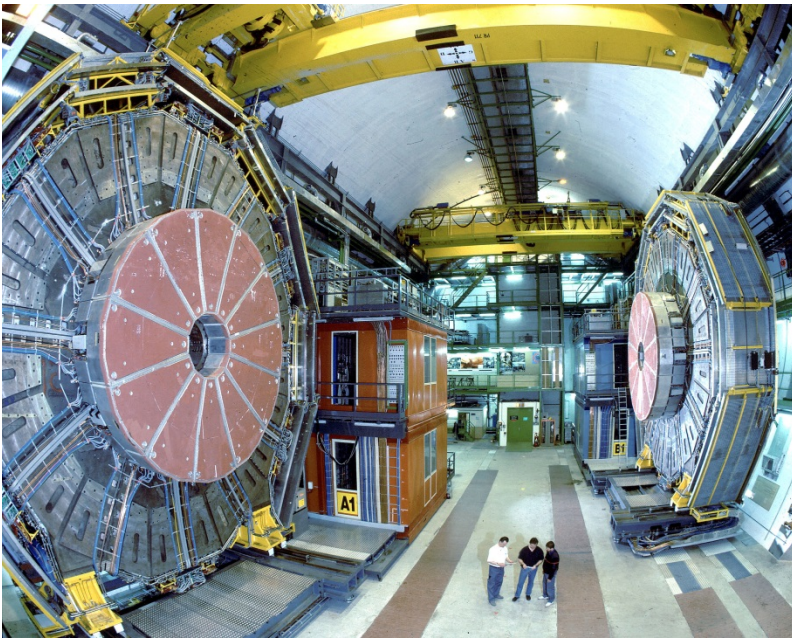
60 ans de CERN en images

- 1989-2000 : le **Grand Collisionneur Electron-Positron (LEP)**
- Installé dans un tunnel de 27 km creusé pour l'occasion
 - Celui qui abrite aujourd'hui le LHC
- Le LEP est alimenté en particules par le SPS



60 ans de CERN en images

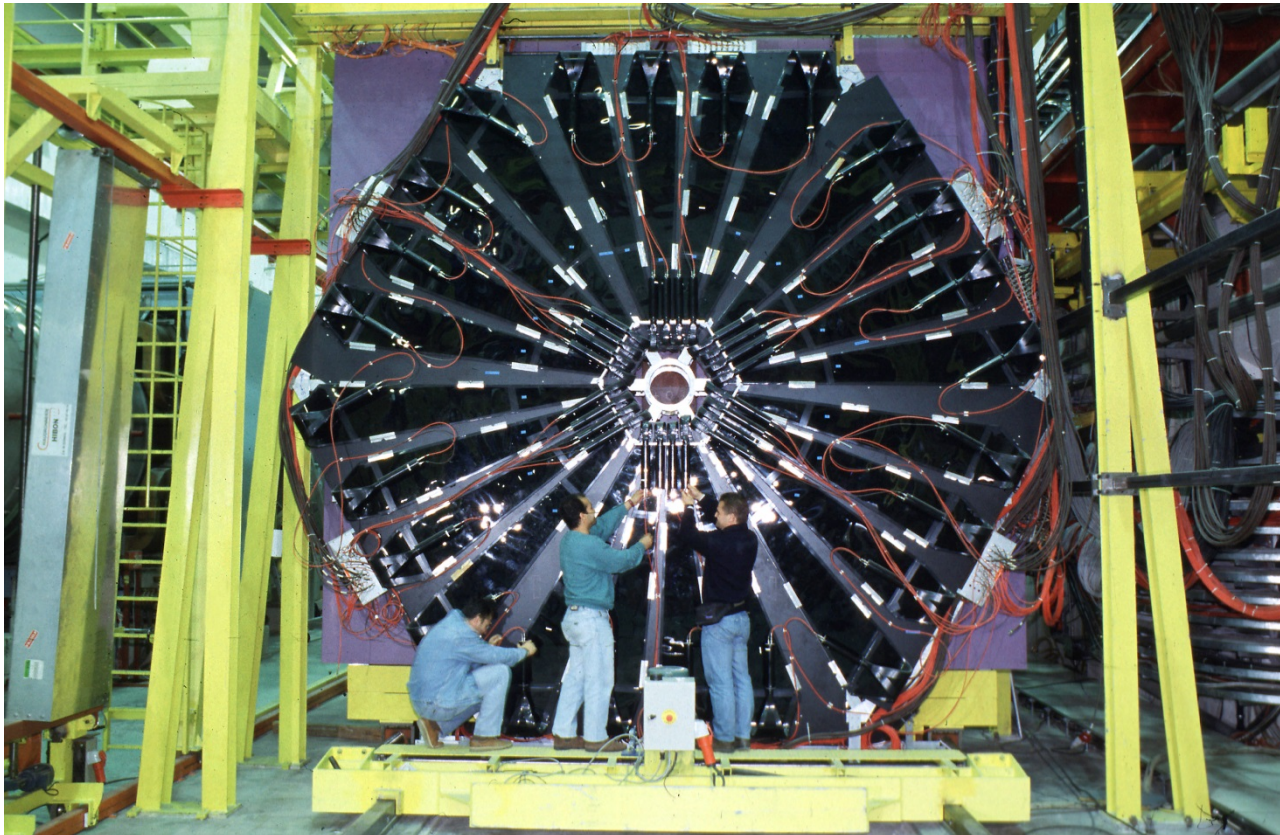
- Quatre détecteurs polyvalents étaient installés sur le LEP pour observer les collisions entre électrons et positrons de haute énergie : **Aleph** (en photo ici), **Delphi**, **L3** et **Opal**.



- Ils ont permis de réaliser de très nombreuses mesures de précision.

60 ans de CERN en images

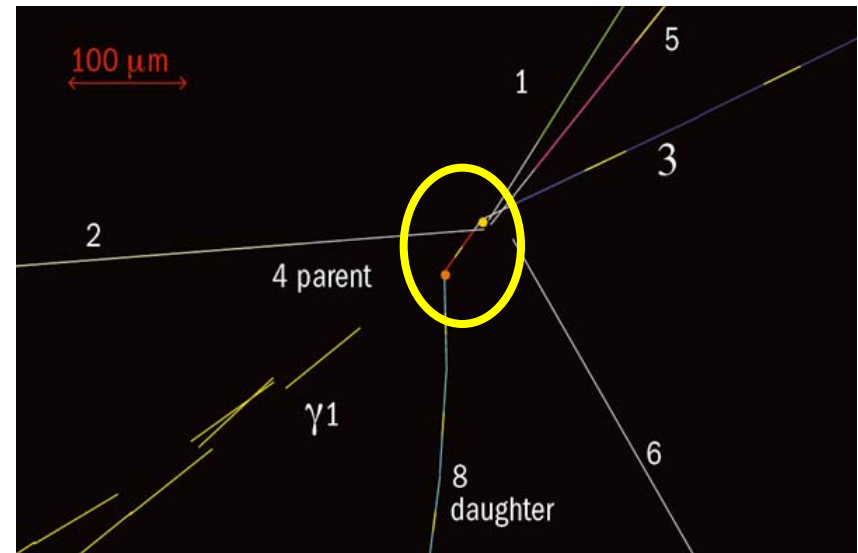
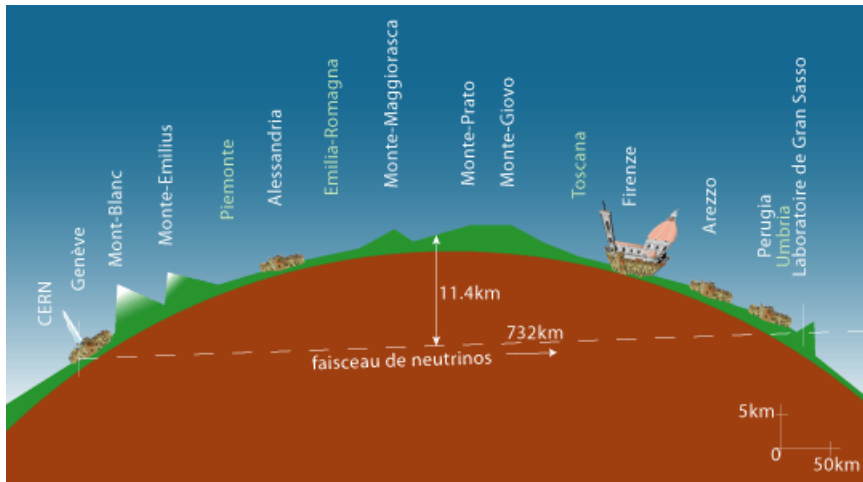
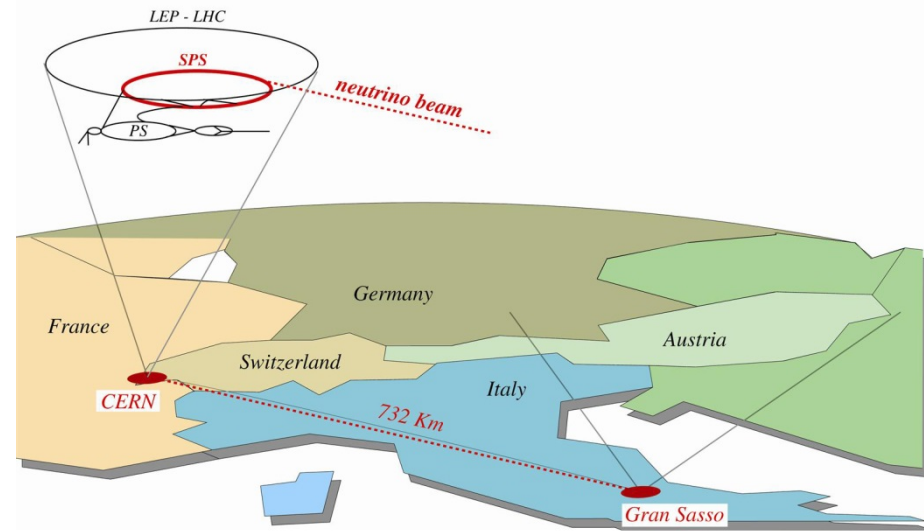
- Début des années 2000 : l'expérience **NA50** utilisant des ions lourds contribue à mettre en évidence « le plasma de quarks gluons » : un état très particulier de la matière qui serait survenu quelques microsecondes après le Big-Bang.



60 ans de CERN en images

- Envoi d'un faisceau de neutrinos vers le laboratoire souterrain du Gran Sasso
 - Distant du CERN de 732 km
- Objectif : étudier le phénomène d'oscillation des neutrinos

CERN to Gran Sasso Neutrino Beam



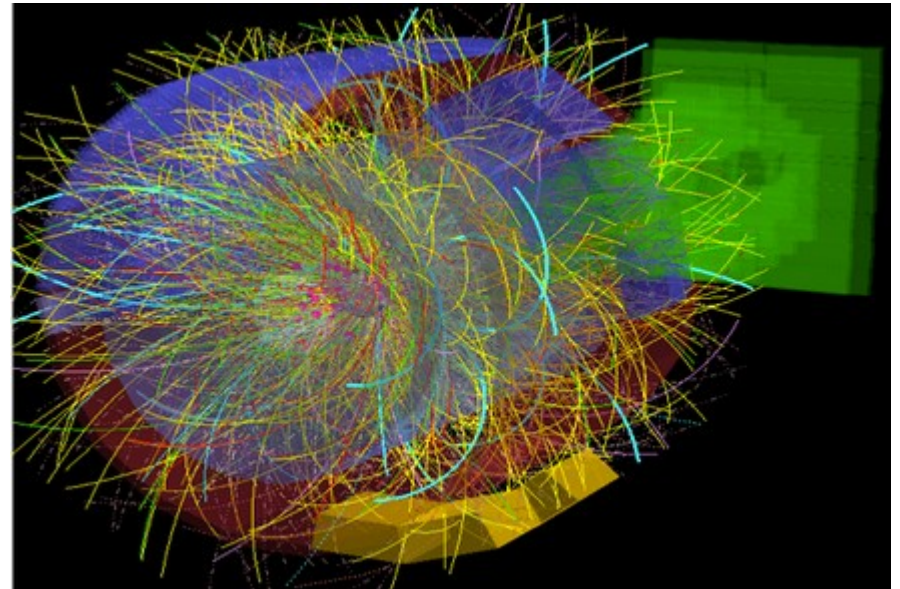
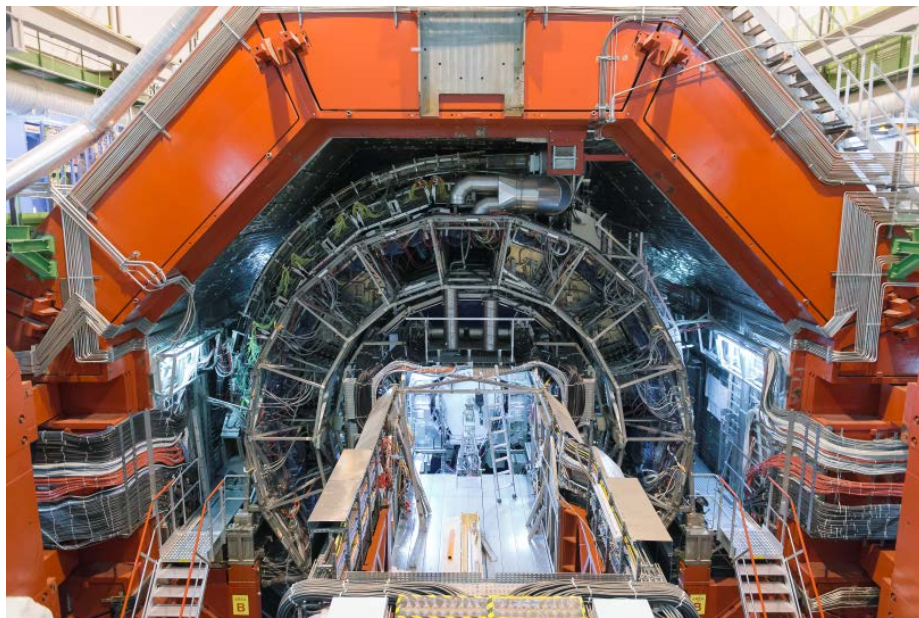
60 ans de CERN en images

- Le **décélérateur d'antiprotons (AD)** est une installation unique qui, depuis l'an 2000, produit des antiprotons de basse énergie notamment utilisés pour explorer les propriétés de l'antimatière (en produisant des atomes d'antihydrogène).



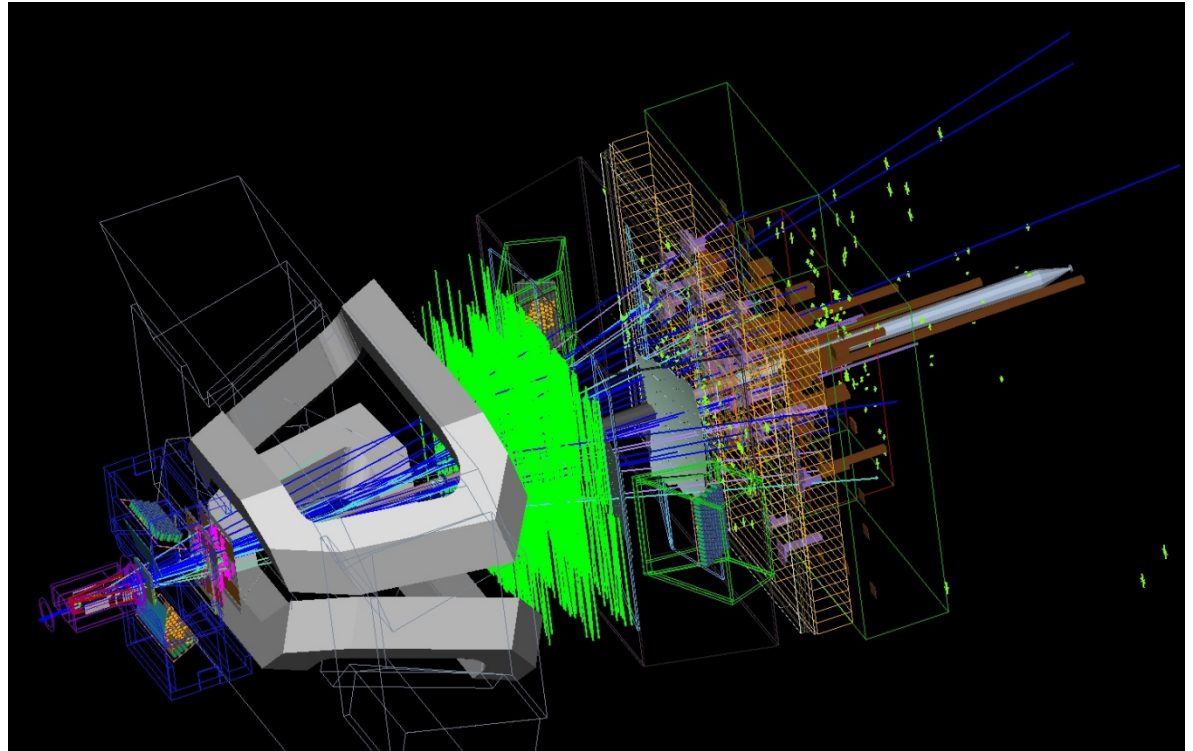
60 ans de CERN en images

- L'étude du « plasma de quarks gluons » continue aujourd'hui grâce au détecteur **Alice (A Large Ion Collider Experiment)** du LHC.
- Des collisions entre ions plomb y récréent les conditions nécessaires à la formation de cet état de la matière :
 - une température cent mille fois plus élevée que le cœur du soleil
 - une densité extrême (environ 40 milliards de tonnes par centimètre cube)



60 ans de CERN en images

- L'expérience **LHCb** du LHC réalise des mesures de précision, notamment à l'aide des mésons B, qui sont des sondes très performantes pour étudier les différences entre matière et antimatière



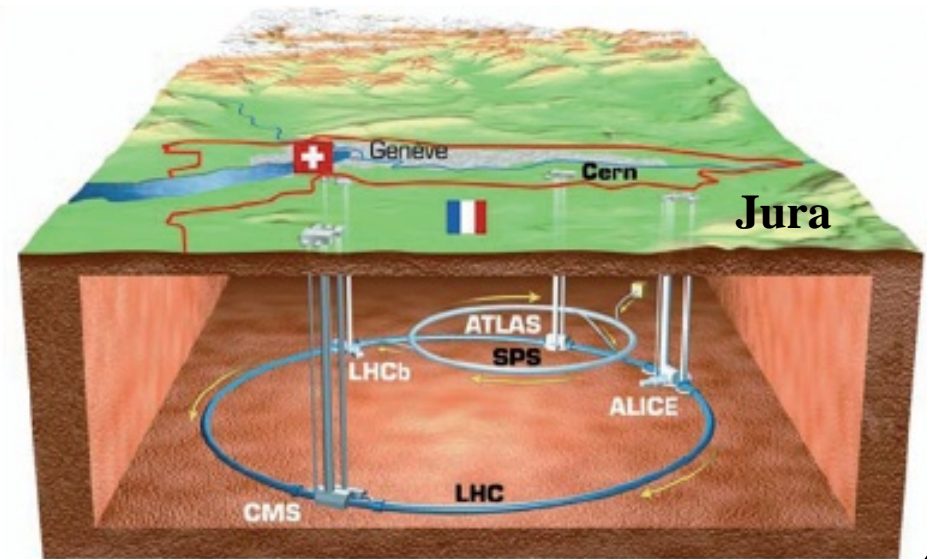
Le LHC

Le LHC



L'ancêtre :
Lawrence
(1930)

- Anneau quasi-circulaire de ~ 27 km de **circonférence** creusé à ~ 100 m **sous terre**
- **2 faisceaux de protons** (ou d'ions Pb selon les périodes) y circulent en sens opposé
- **Ils se croisent au centre de 4 détecteurs géants** (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) où se produisent les collisions dont les produits sont étudiés par les physiciens
- Les particules sont accélérées par tout une série d'accélérateurs en amont ; la dernière phase de ce processus a lieu dans l'anneau LHC lui-même



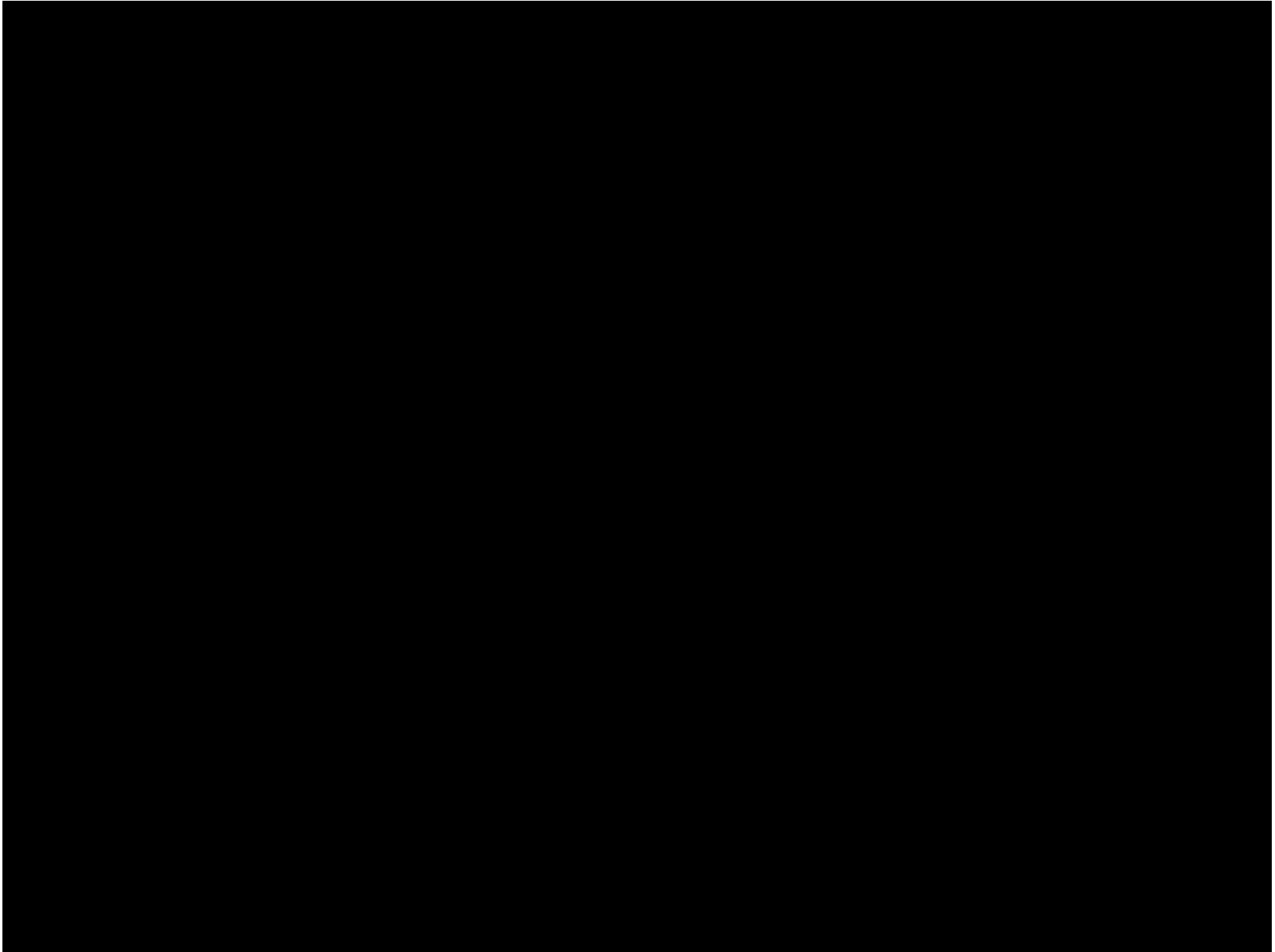
Le LHC en quelques chiffres

- **Consommation d'électricité** : ~ 400 GWh/an (5% de la consommation de la SNCF)
- Les particules accomplissent **11 000 tours / seconde** à la **vitesse de la lumière**
- La **pression** dans le tube à **vide** est **10 fois inférieure** à celle sur la Lune
- Les **aimants** sont au nombre de **9 300** environ ; ils sont refroidis à **-271,3°C**
→ **Plus froid que l'espace intersidéral !**

En fonctionnement nominal (pas encore atteint) :

- **Les particules se croiseront ~ 40 millions de fois par seconde** dans les détecteurs et chaque interaction produira **~ 20 collisions proton-proton**
- Il y aura **~ 300 000 000 000 000 de protons** en même temps dans le LHC
- **L'énergie stockée** dans le **faisceau** équivaudra à celle de **80 kg** de TNT
aimants **240 kg**
- L'énergie nominale des collisions est **14 TeV** (**13 TeV actuellement**)

Accélération des particules au LHC



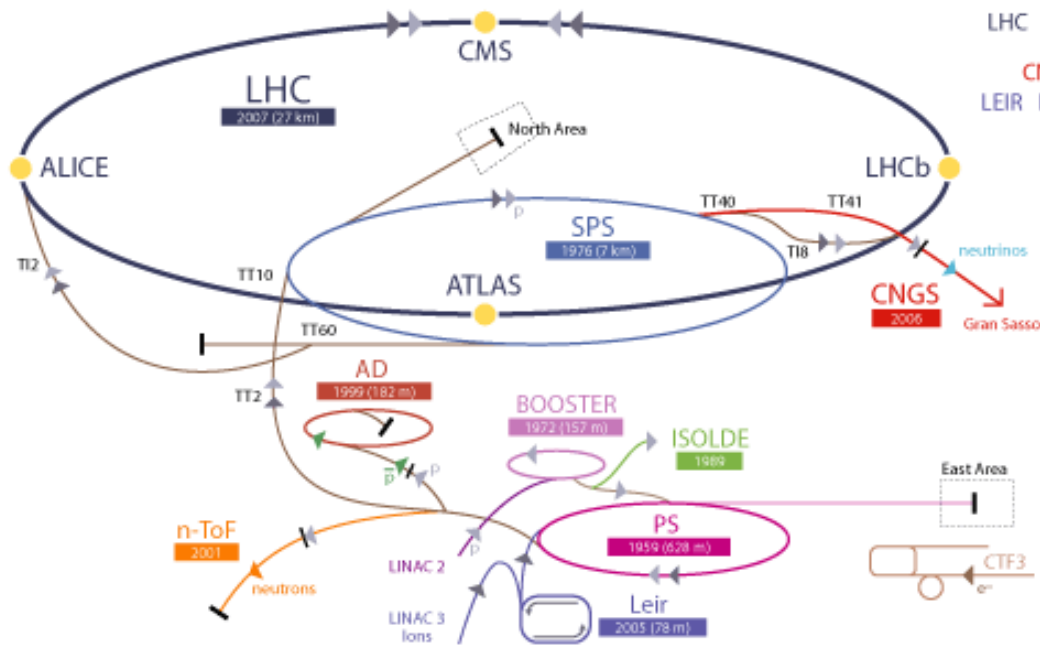
Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

- **Des cathédrales de métal et d'électronique !**
 - Dimensions de **plusieurs dizaines de mètres**
 - Poids de **plusieurs milliers de tonnes** (\approx Tour Eiffel)
- Des **millions de canaux électroniques** reçoivent des informations lors des collisions
 - **Les particules déposent de l'énergie en traversant les différents détecteurs ; ces dépôts sont convertis en signaux électriques puis lus**
 - Surfaces/volumes actifs, câbles, alimentations, etc.
- **Volume total de données : \sim plusieurs Encyclopédia Universalis / seconde**
 - Impossible de tout conserver
 - **Tri en temps réel des événements** : **drastique** et très performant
- Données stockées et analysées au moyen de **milliers d'ordinateurs** répartis dans des **centaines de centres de calcul** du monde entier
- Chaque collaboration du LHC compte **plusieurs milliers de membres**



Accélération des particules au LHC

CERN Accelerator Complex



▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ neutrinos ▶ electron
 ⇄⇄⇄ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 CNGS CERN Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



Contributions IN2P3 au LHC

- CNRS + industries
- Contribution supplémentaire liée au CEA/Irfu
 - Non prise en compte ici

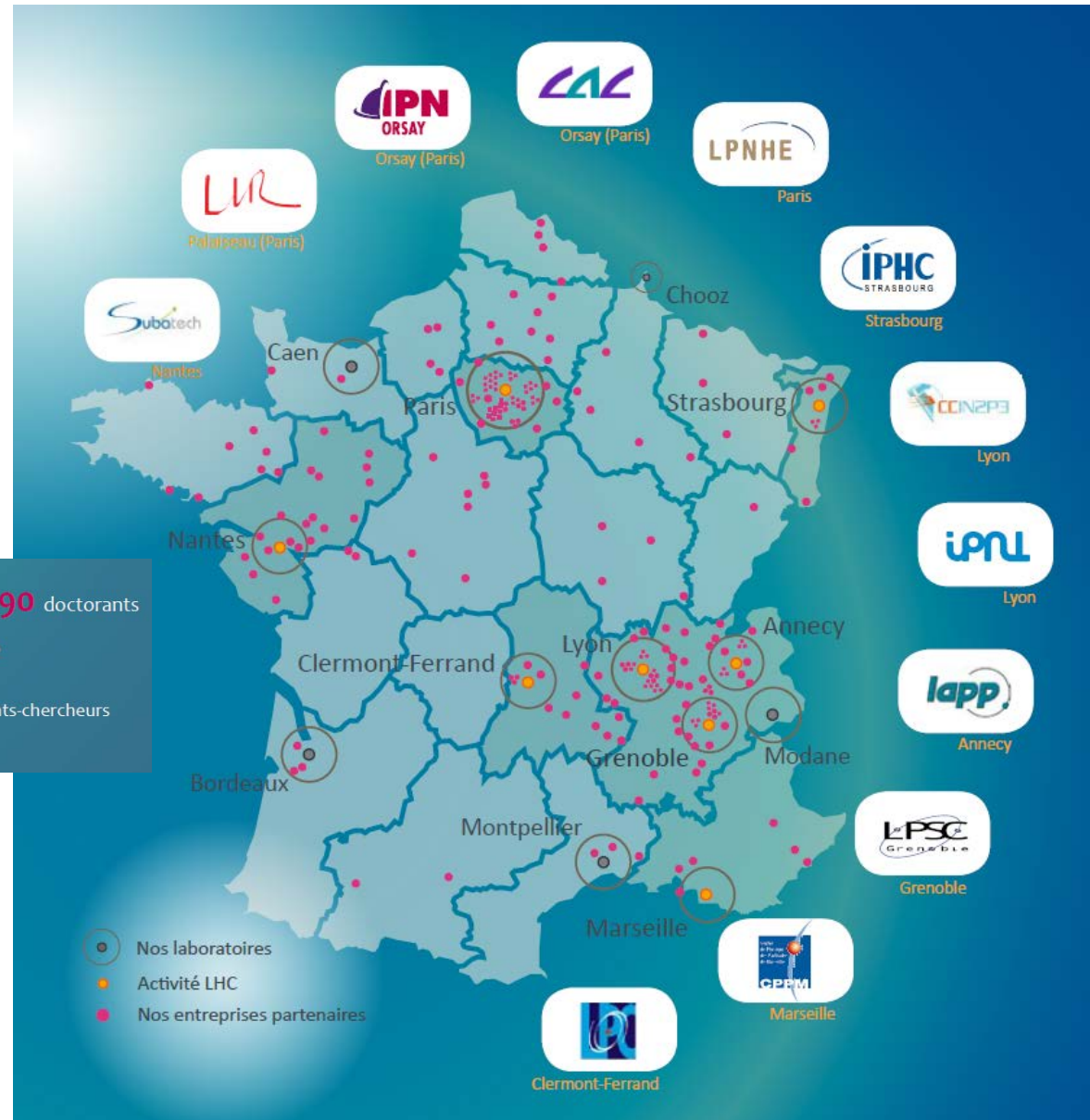
L'IN2P3 au LHC

12 laboratoires 90 doctorants

400 entreprises en France

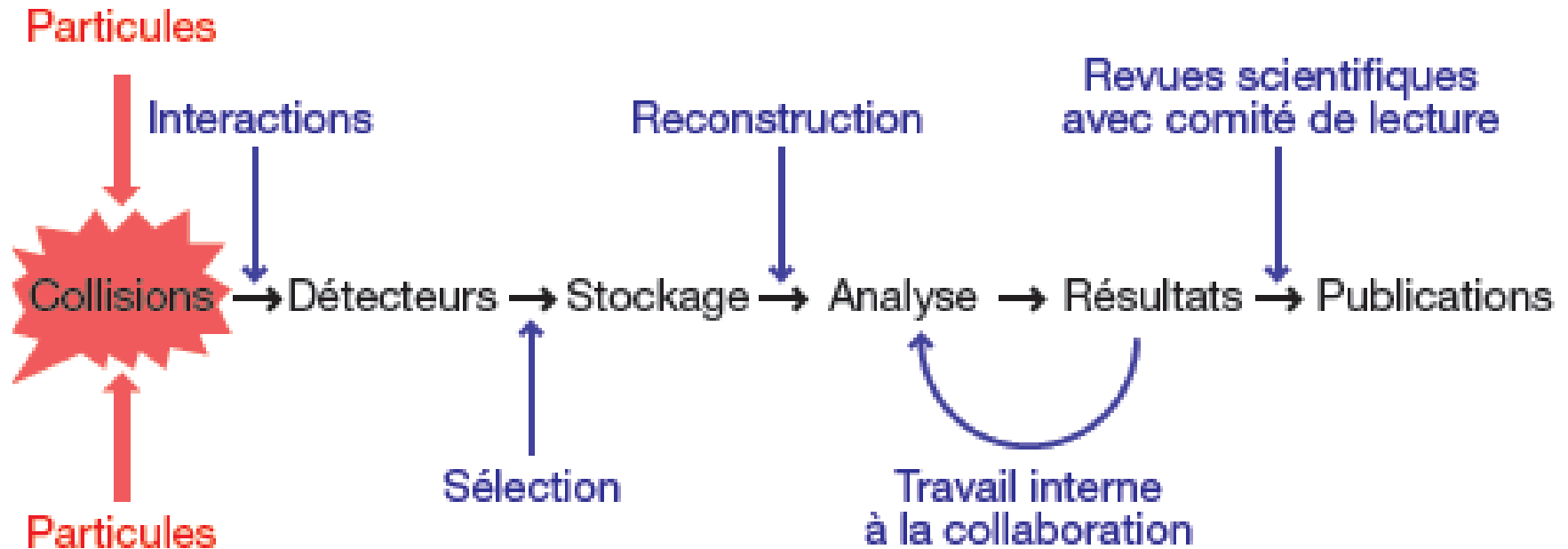
175 M€ d'investissement et R&D

370 chercheurs et ingénieurs 60 enseignants-chercheurs



Comment analyser les données du LHC ?

- Schéma suivi par une analyse typique :

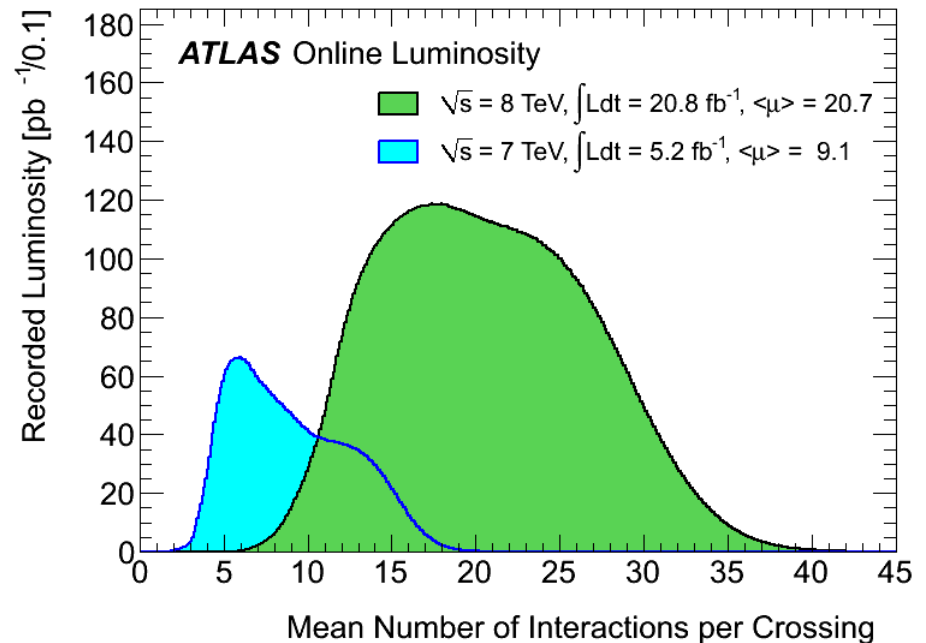
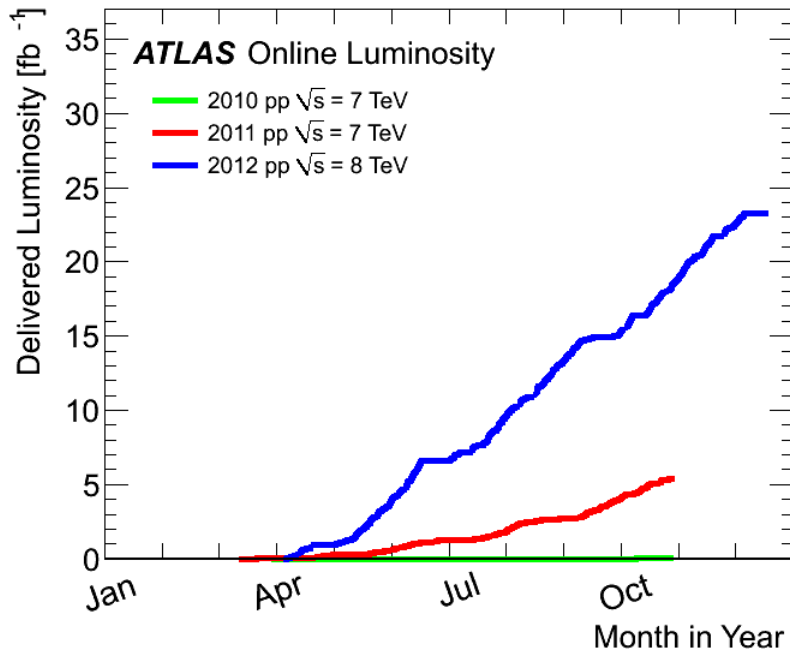


- Utilisation intensive d'ordinateurs pour
 - accéder/utiliser les données enregistrées au CERN
 - simuler le comportement du détecteur lors du passage des particules étudiées
- Mise en œuvre de méthodes mathématiques sophistiquées pour obtenir les résultats les plus précis possibles et tester leur validité
- La « maturation » d'un résultat peut prendre une année voire plus

Présent & futur du LHC

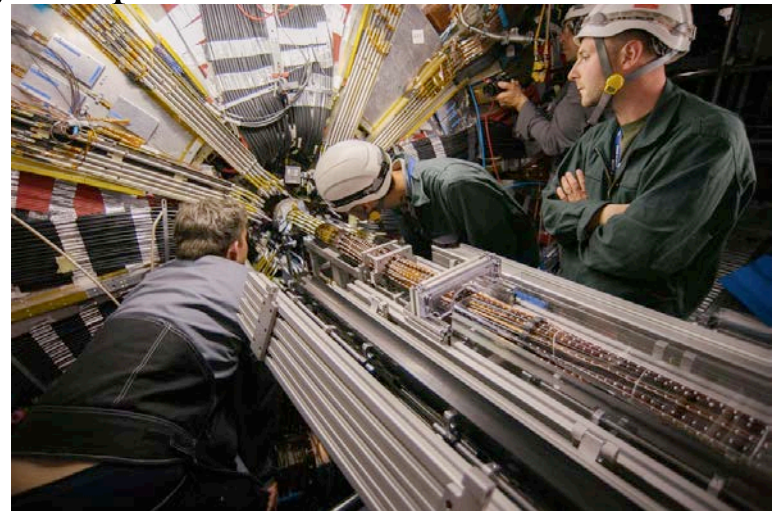
Performances du 1^{er} Run (2010-2012)

Parameter	2010	2011	2012	design value
Beam energy	3.5	3.5	4	7
β^* in IP 1 and 5 (m)	2.0/3.5	1.5/1.0	0.6	0.55
Bunch spacing (ns)	150	75/50	50	25
Max. number of bunches	368	1380	1380	2808
Max. bunch intensity (protons per bunch)	1.2×10^{11}	1.45×10^{11}	1.7×10^{11}	1.15×10^{11}
Normalized emittance at start of fill (mm mrad)	≈ 2.0	≈ 2.4	≈ 2.5	3.75
Peak luminosity ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	2.1×10^{32}	3.7×10^{33}	7.7×10^{33}	1×10^{34}
Max. mean number of events per bunch crossing	4	17	37	19
Stored beam energy (MJ)	≈ 28	≈ 110	≈ 140	362



2013-2015 : 1^{er} arrêt longue durée

- **Maintenance prévue de longue date**
 - ~1 mois pour réchauffer/refroidir le LHC (accélérateur cryogénique)
- **Entretien et améliorations**
 - de l'ensemble des composants de la machine
 - et des détecteurs
- **Préparation aux prises de données futures**
 - A plus haute énergie : 8 → 13 puis 14 TeV
 - A plus haute intensité : pour enregistrer toujours plus d'événements
- Renforcement des interconnexions entre les aimants
 - Suite du programme d'amélioration consécutif à l'accident de septembre 2008
- **Redémarrage au printemps 2015**



Run 2 : 2015-2018

- Collisions à 13 TeV (8 TeV en 2012)
- Paquets séparés de 25 ns (50 ns en 2012)

} « Nouvelle » machine

→ 2015 : année de « rôdage »

- Peu de données accumulées

→ 2016 : excellente cuvée

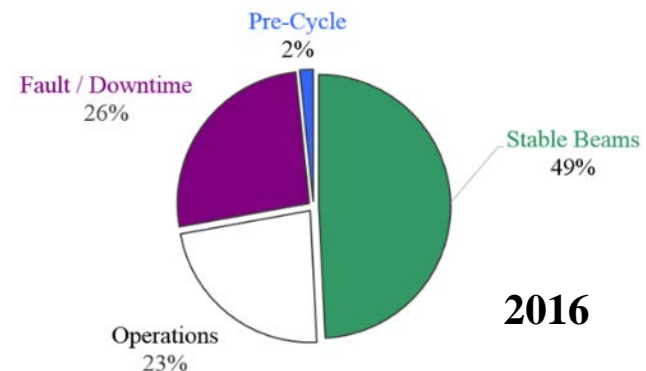
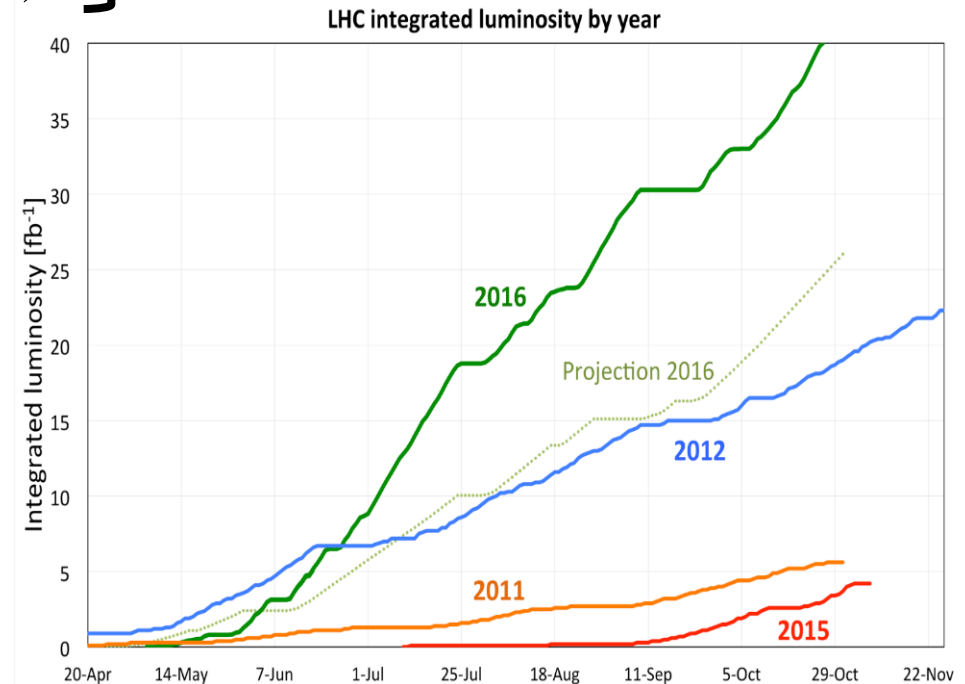
- L'apprentissage de 2015 a payé !

- Toujours pas de nouvelle physique à l'horizon ...

- Arrêt hivernal jusqu'à fin mars

- Maintenance + jouvence de certaines installations du complexe accélérateur

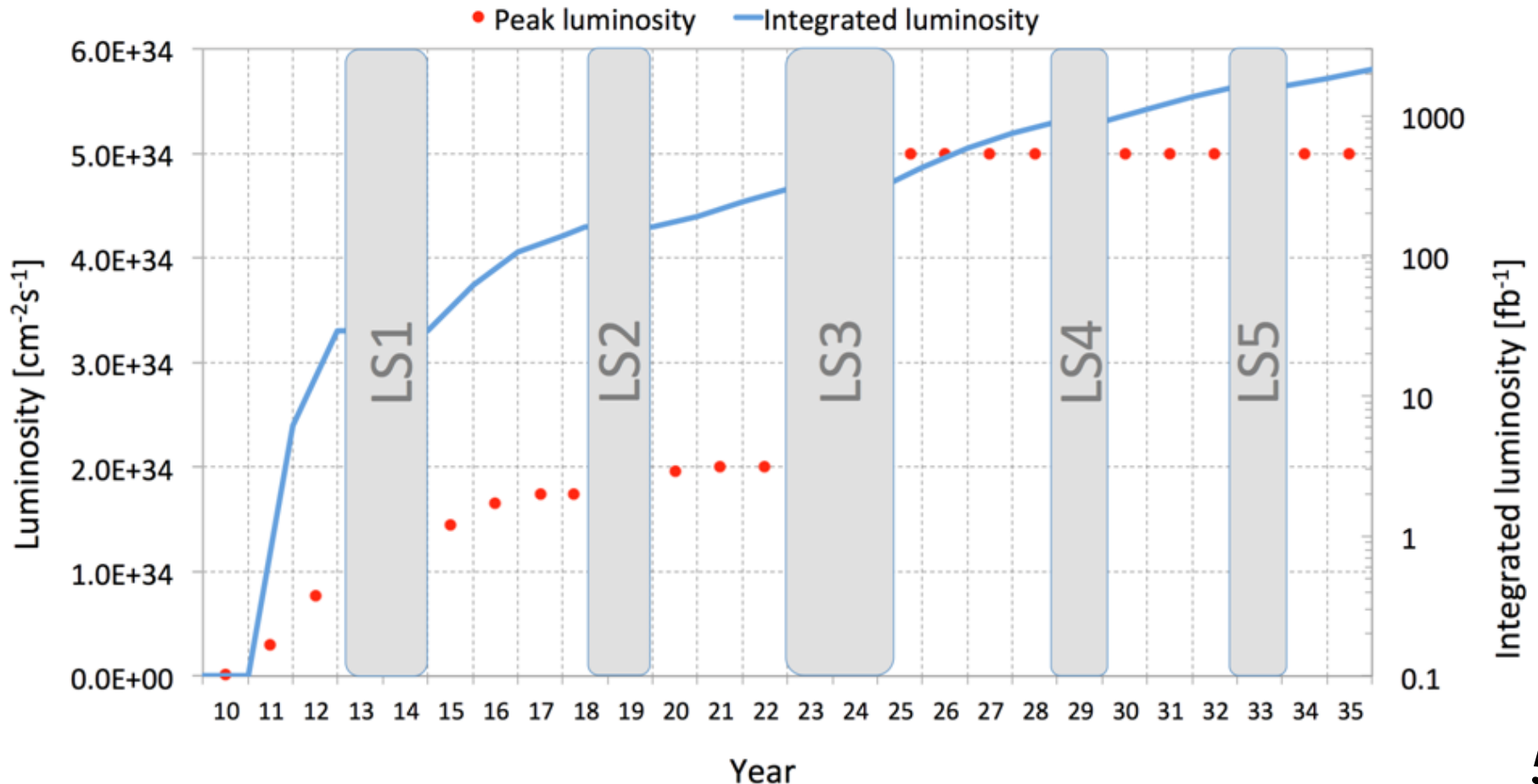
- Reprise des collisions au printemps 2017



2016

Le programme futur du LHC

- Evolution possible du LHC jusqu'en ... **2035** !
 - **Points rouges**, échelle verticale de gauche (linéaire) : intensité des collisions
 - **Ligne bleue**, échelle verticale de droite (logarithmique) : nombre d'événements enregistrés (unité arbitraire)



Pour en savoir plus sur le LHC

- Le site **LHC-France**
<http://www.lhc-france.fr>
- Site grand public du **CERN**
<http://public.web.cern.ch/public/welcome-fr.html>
- Sites grand public des **expériences du LHC** :
 - ALICE <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>
 - ATLAS <http://atlas.ch>
 - CMS <http://cms.web.cern.ch>
 - LHCb <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public>
- Films disponibles gratuitement sur le web :
 - Film “Bottle to Bang” produit et dirigé par Chris Mann (© CERN, 2008)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1125472>
 - Film « LHC First Physics » (© CERN video productions, 2010)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1259221>