

L'Intelligence Artificielle à la rescousse du boson de Higgs

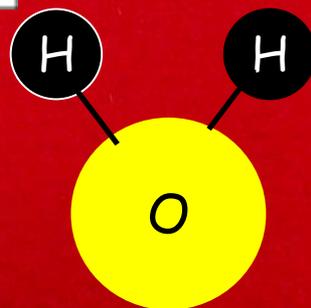
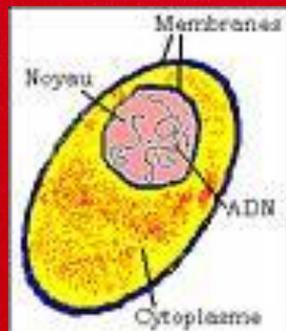
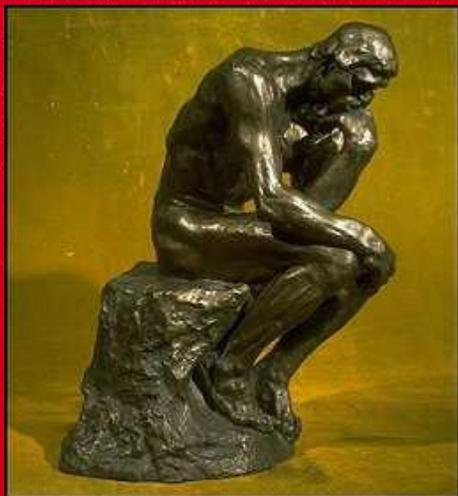
1ère partie

David Rousseau @dhpmrou
LAL-Orsay, CNRS/IN2P3, Université Paris-Sud/Paris-Saclay

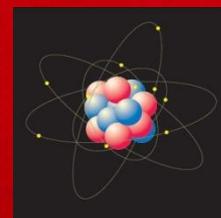
rousseau@lal.in2p3.fr

Le boson de Higgs en quelques transparents

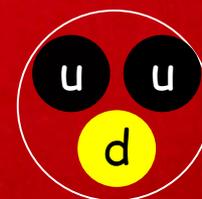
Voyage vers l'infiniment petit



électron



proton



Quark up



↑
Homme
~1 m

↑
Cellule
~10⁻⁶m

↑
Molécule
~10⁻⁹m

↑
Atome
~10⁻¹⁰m

↑
Noyau
~10⁻¹²m

↑
Nucléons
↑
Quarks
~10⁻¹⁵m

La Matière: les FERMIONS

Quarks

$q = +\frac{2}{3}$



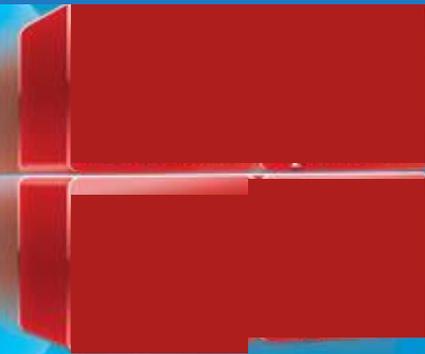
$q = -\frac{1}{3}$

Leptons

$q = -1$



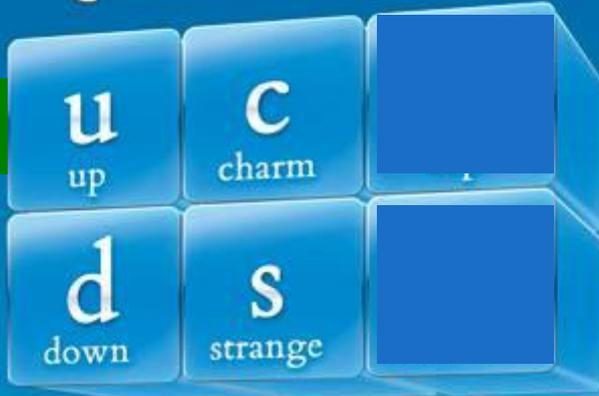
$q = 0$



La Matière: les FERMIONS

Quarks

$q = +\frac{2}{3}$



$q = -\frac{1}{3}$

Leptons

$q = -1$



$q = 0$

La Matière: les FERMIONS

Quarks

$q = +\frac{2}{3}$

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

$q = -\frac{1}{3}$

Leptons

$q = -1$

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

$q = 0$

Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

$q = +\frac{2}{3}$

$q = -\frac{1}{3}$

Quarks

ū top	c̄ charm	ū up
d̄ bottom	s̄ strange	b̄ down

$q = -\frac{2}{3}$

$q = +\frac{1}{3}$

Antimatière

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

$q = -1$

$q = 0$

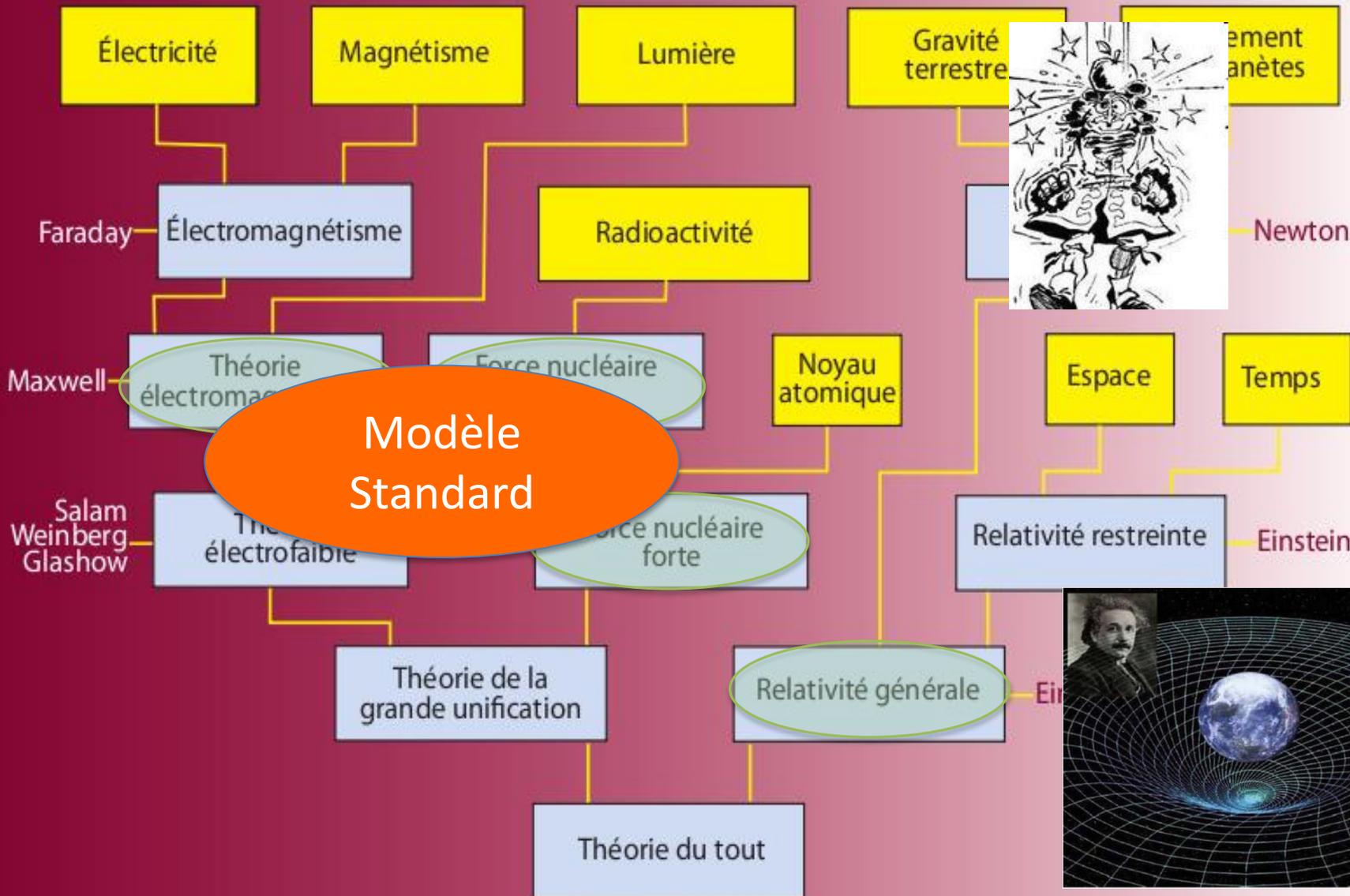
Leptons

ē electron	μ̄ muon	τ̄ tau
ν̄_e electron neutrino	ν̄_μ muon neutrino	ν̄_τ tau neutrino

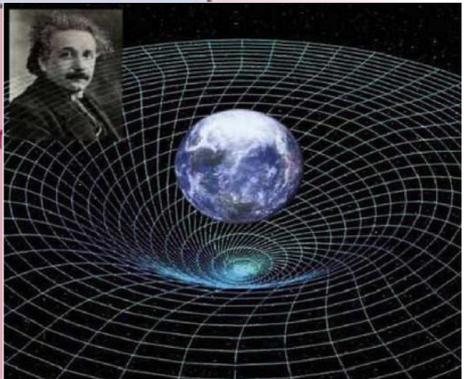
$q = +1$

$q = 0$

L'UNIFICATION DES FORCES DE LA NATURE



Modèle Standard



Temps

La Matière: les FERMIONS

Modèle Standard des particules

Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Les Forces: les BOSONS

La masse!
?

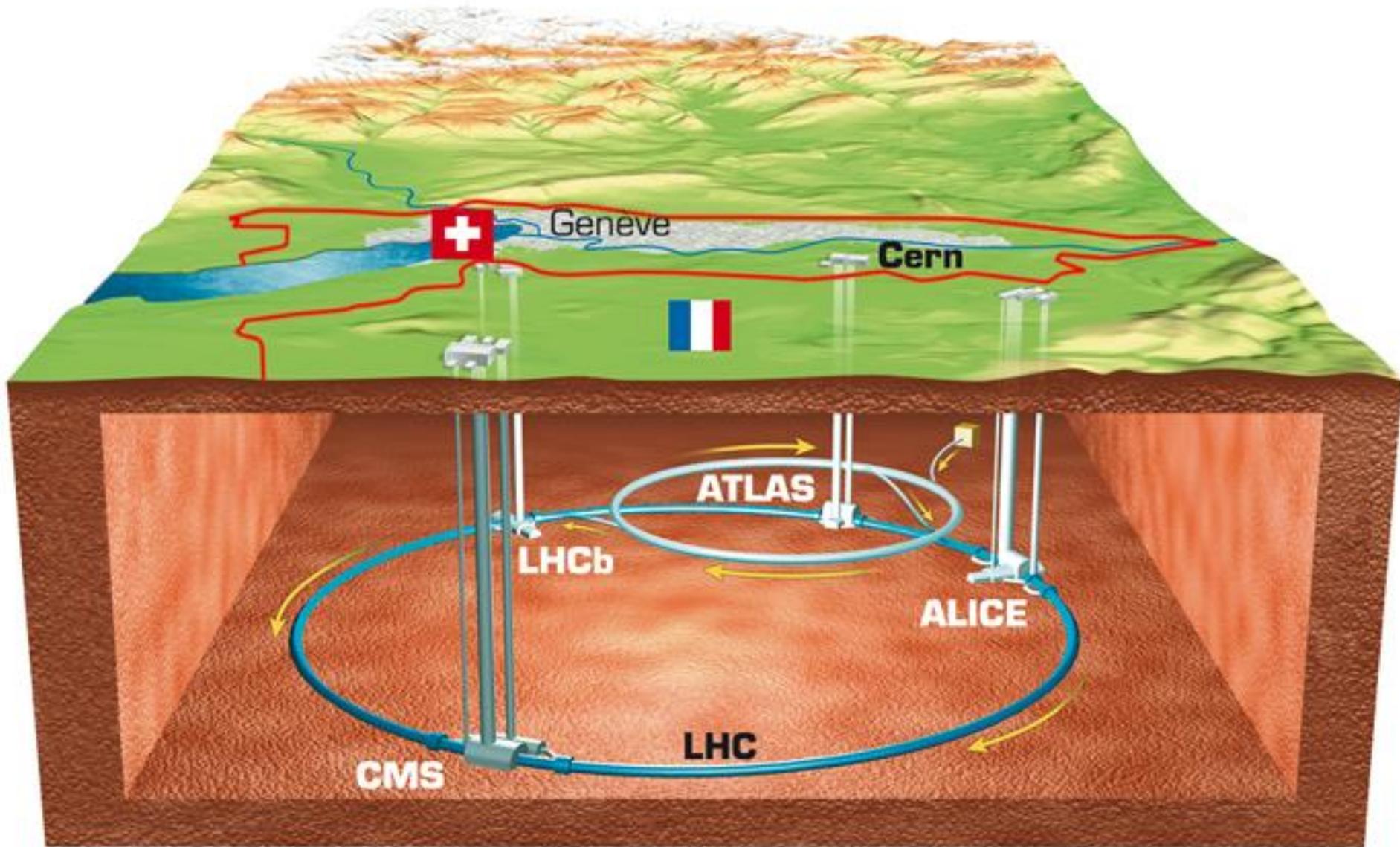
H
Higgs boson

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

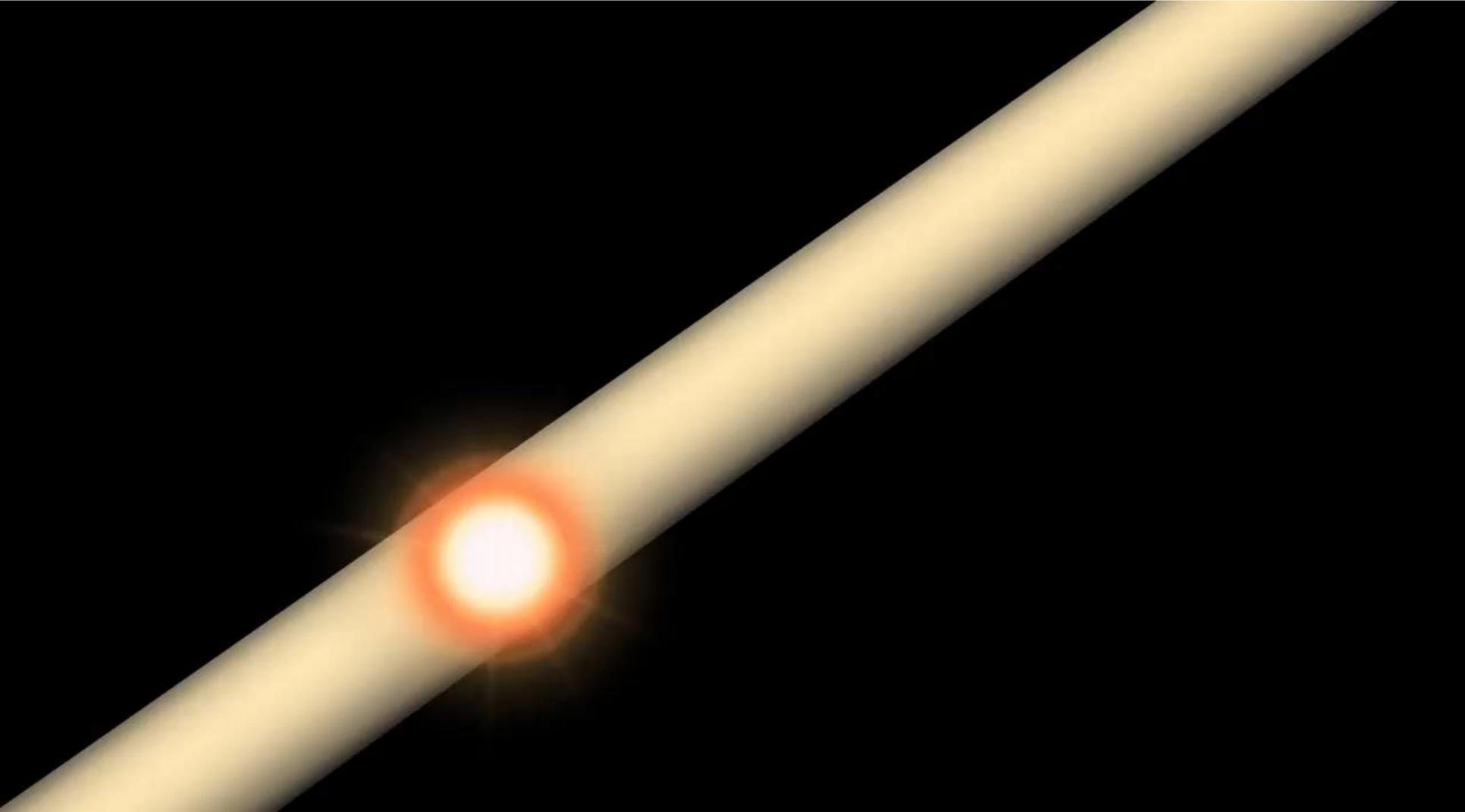
+Antiparticules

VOIR les particules ?

Le LHC



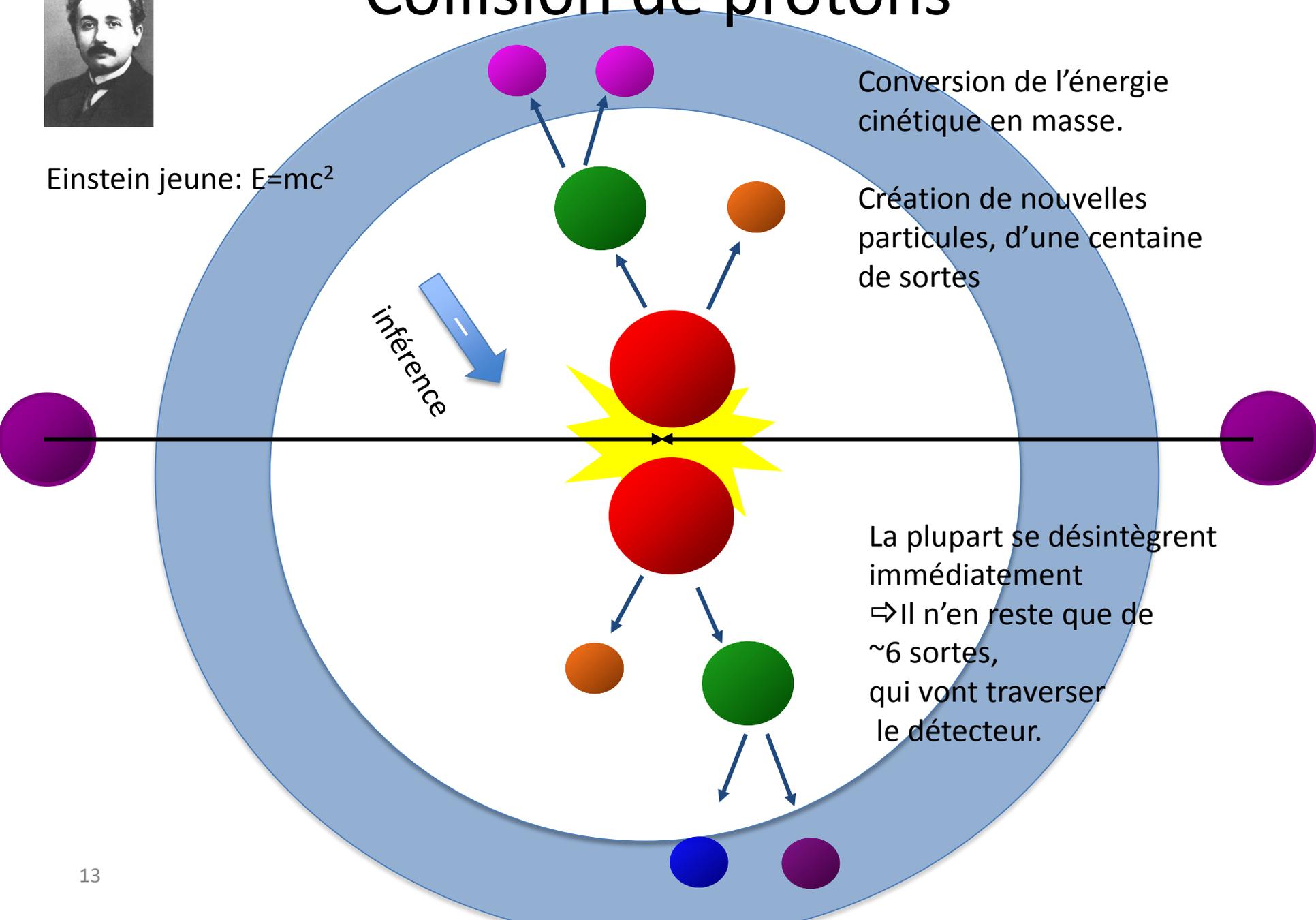
LD, booster





Collision de protons

Einstein jeune: $E=mc^2$



Conversion de l'énergie cinétique en masse.

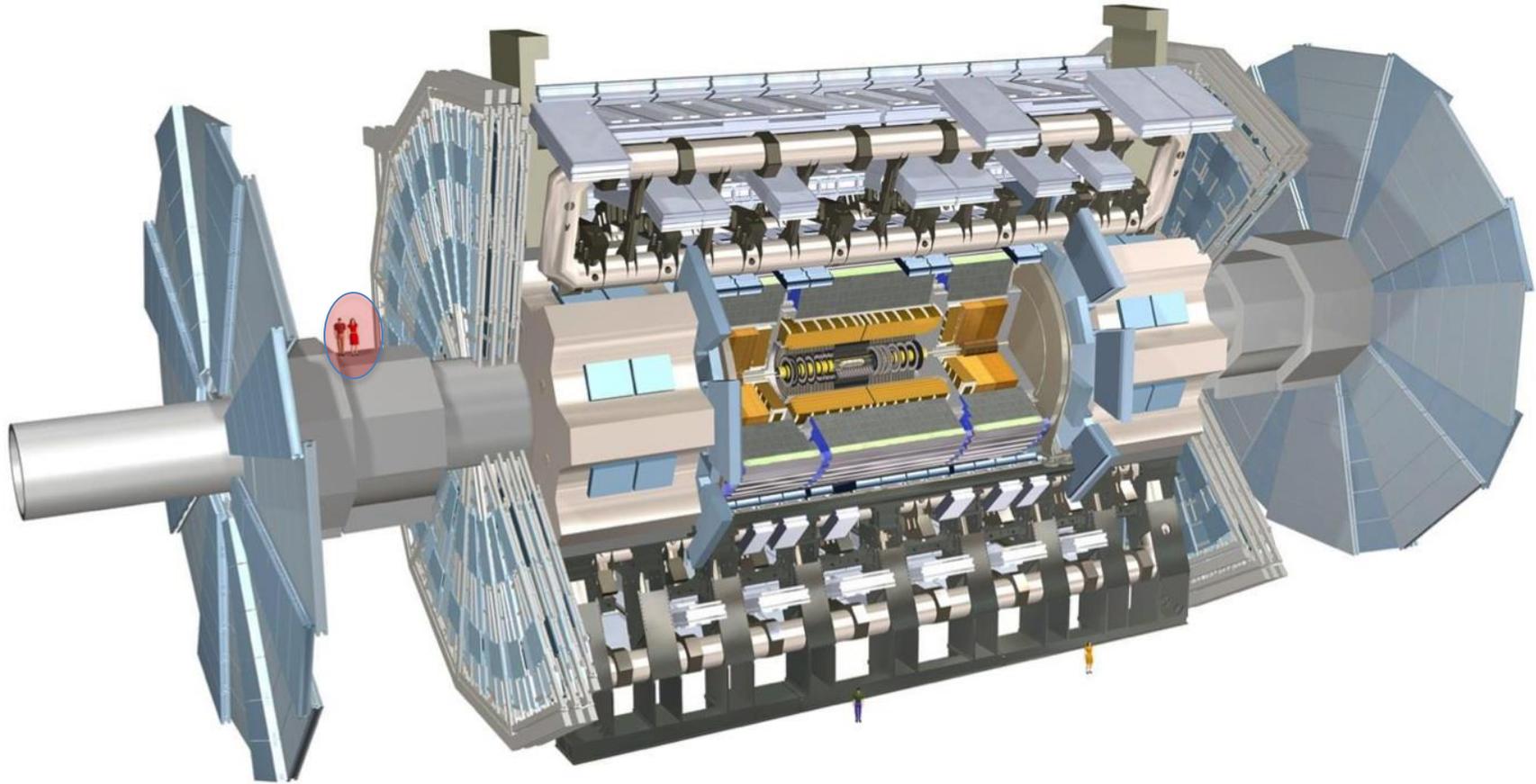
Création de nouvelles particules, d'une centaine de sortes

La plupart se désintègrent immédiatement
⇒ Il n'en reste que de ~6 sortes, qui vont traverser le détecteur.

Le détecteur Atlas

Diamètre: 25m
Longueur: 46m
Poids: 7000
tonnes

3000 km de câbles
100 millions de canaux

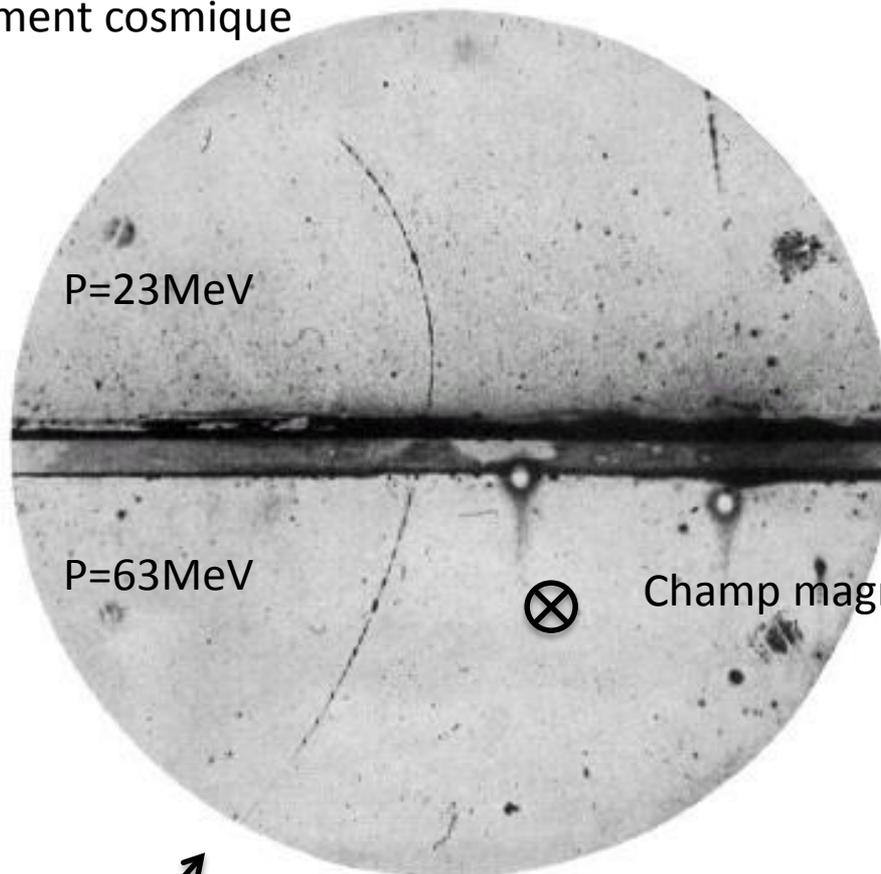


Découverte du positron (Anderson 1932), l'anti-électron
postulé par Dirac (mais Anderson l'ignorait)

(en joignant les équations de la mécanique quantique et de la relativité restreinte,
Dirac a vu apparaître comme solutions des électrons d'énergie négative)



Photo dans une chambre à brouillard (« de Wilson »),
soumise au rayonnement cosmique



Nobel 1936

Plaque de plomb

Champ magnétique

FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 7.5 \times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

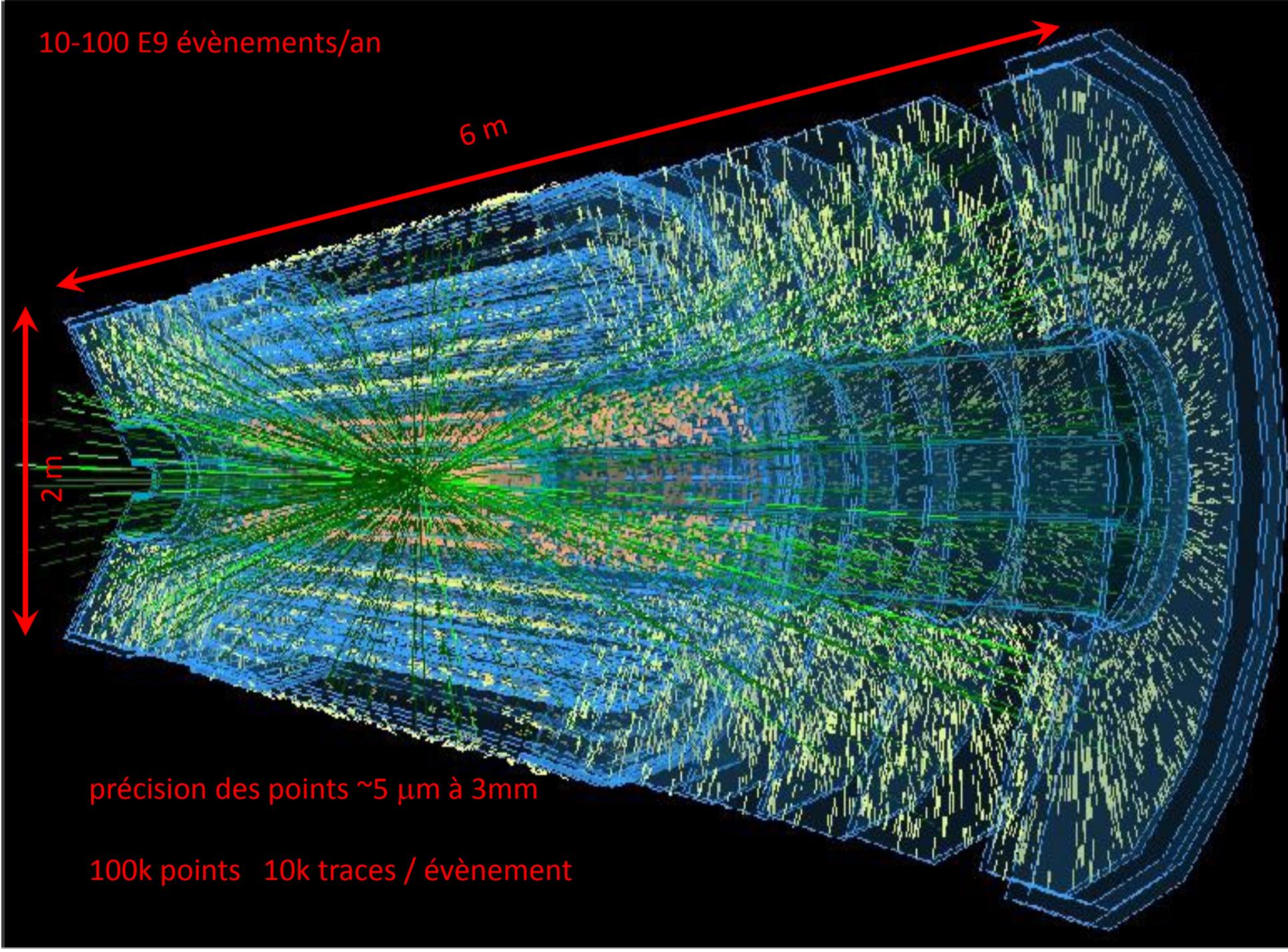
10-100 E9 évènements/an

6 m

2 m

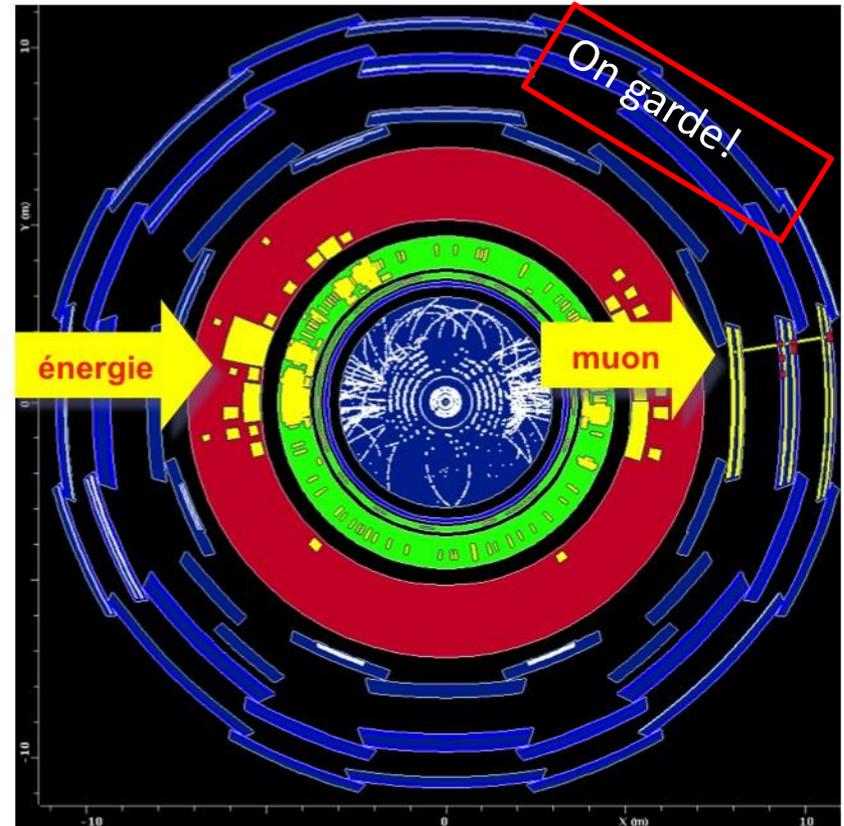
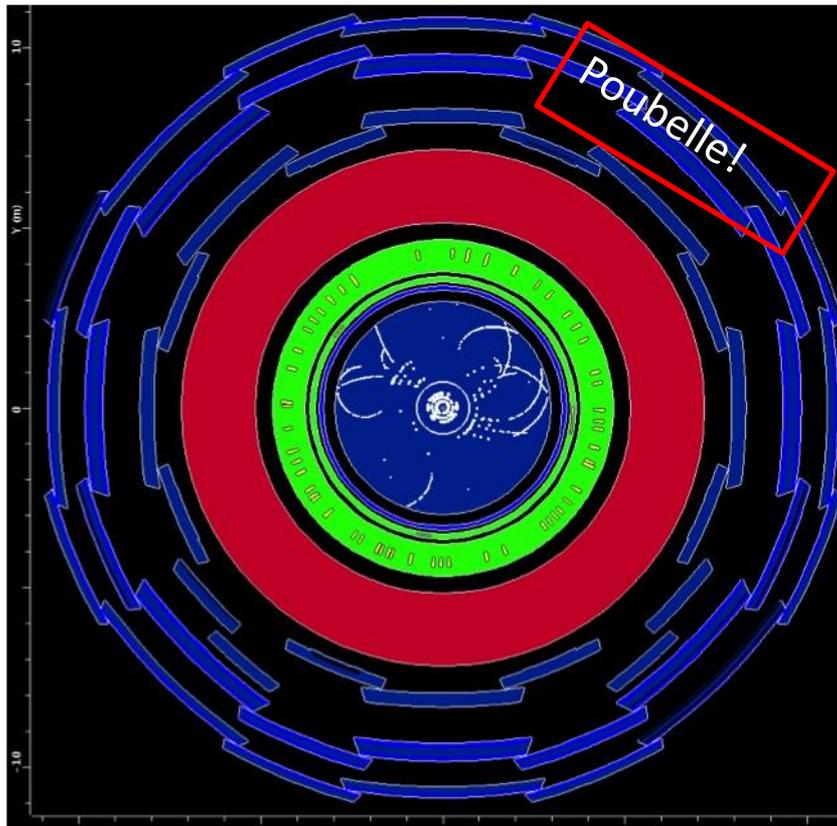
précision des points $\sim 5 \mu\text{m}$ à 3mm

100k points 10k traces / évènement



Sélection des événements en temps réel

- 20 millions de collision de paquets par seconde
- 400 événements sélectionnés (1/50.000) au vol
- ⇒ échantillonnage en cascade, décision en $1\mu\text{s}$ - 1s sur des *signatures*



VOIR le boson de Higgs

Avant de le voir, on savait tout sur le boson de Higgs, sauf sa masse

Particule très instable (10^{-22} s), se désintègrant immédiatement en paire d'autres particules, de façon imprévisible (sauf en moyenne)

**Probabilités de désintégration
prédites pour une masse de 125 GeV**

H \rightarrow bb 58%

H \rightarrow WW* 21%

H \rightarrow τ + τ - 6.4%

H \rightarrow ZZ* 2.7%

H \rightarrow $\gamma\gamma$ 0.2%

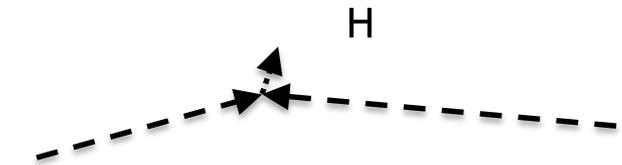
$$E=mc^2$$



Einstein en 1905

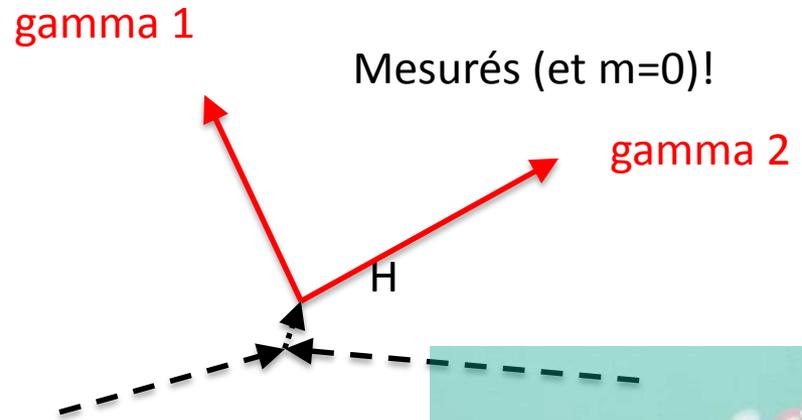
En fait, la formule complète est $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
 p est l'impulsion, mv en mécanique classique
 En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c :

$$E^2=p^2+m^2$$



H, juste avant sa désintégration

$$m_H^2=E_H^2-p_H^2$$



Juste après sa désintégration



Conservation énergie et impulsion

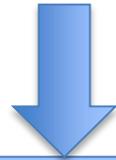
$$E_H=E_{g1}+E_{g2}$$

$$\vec{p}_H=\vec{p}_{g1}+\vec{p}_{g2}$$

⇒ on en déduit $m_H!$

Finalemment...

10^{14} collisions



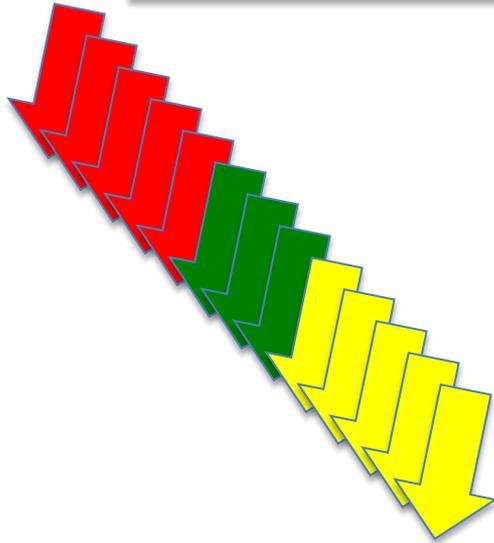
Tri rapide et grossier

10^9 événements sur disque

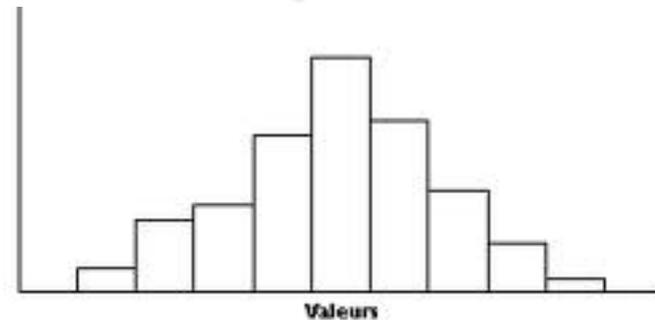


Tri précis

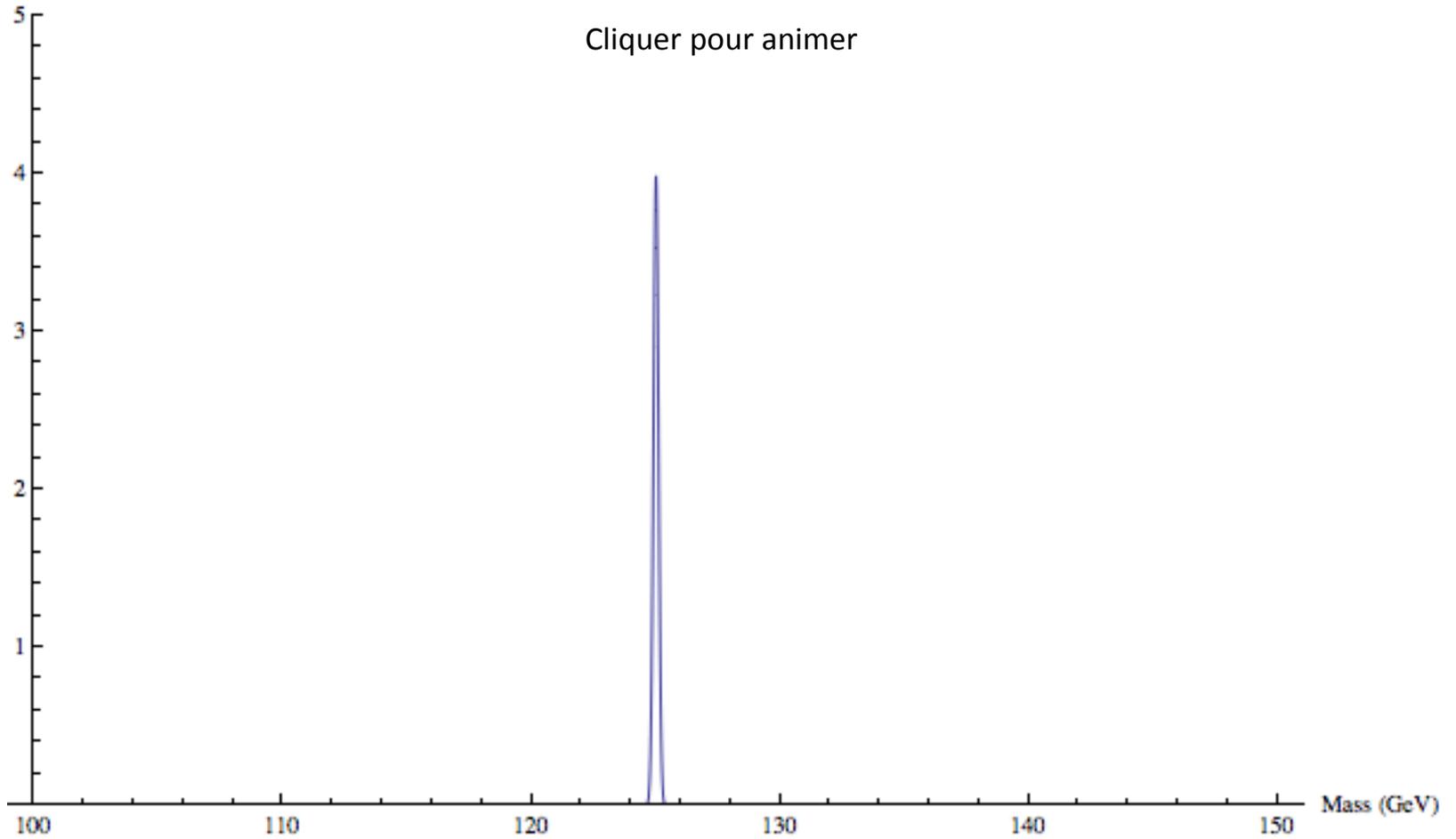
10^5 événements à 2 gamma



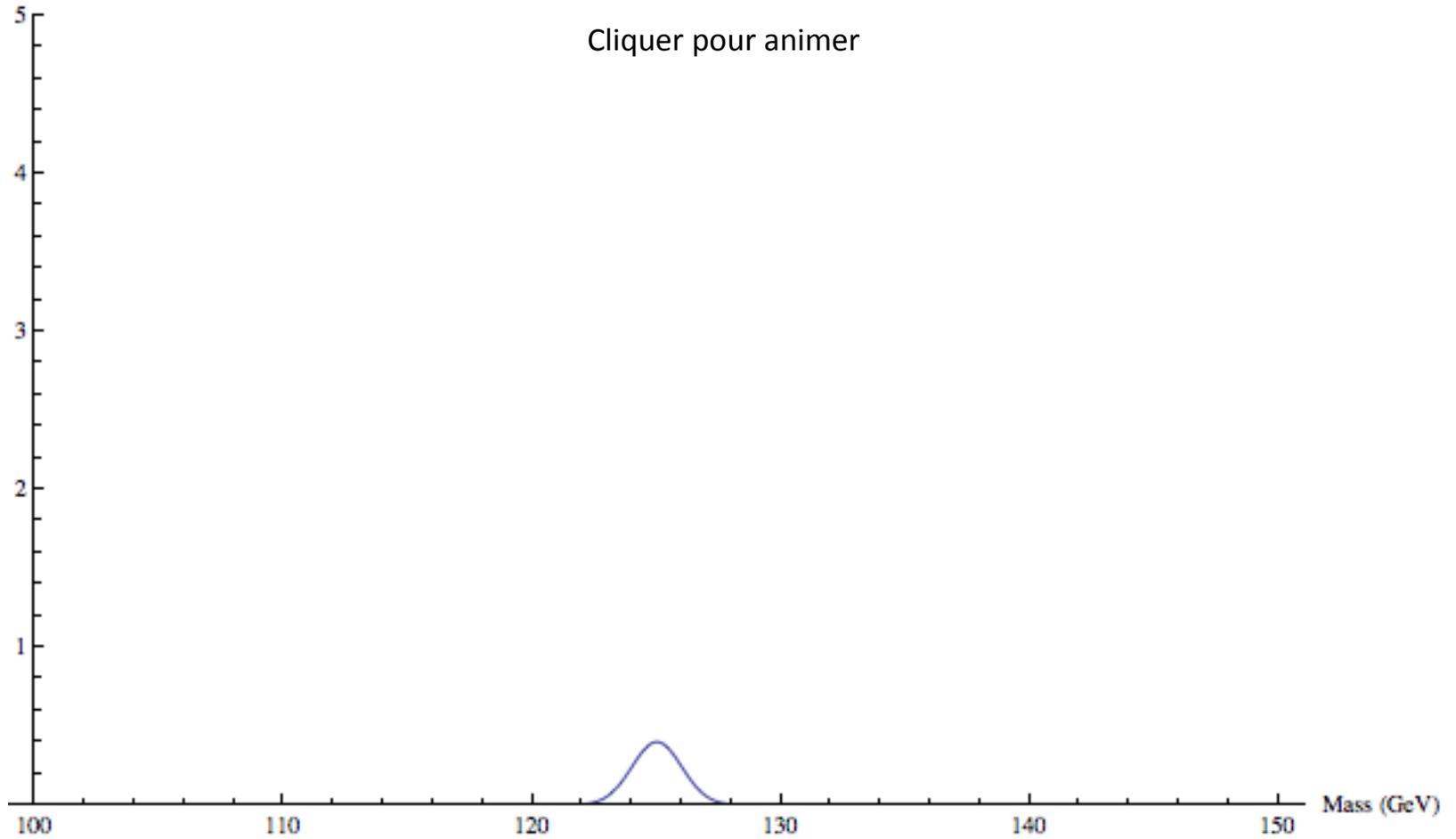
Calcul de la masse
→ histogramme



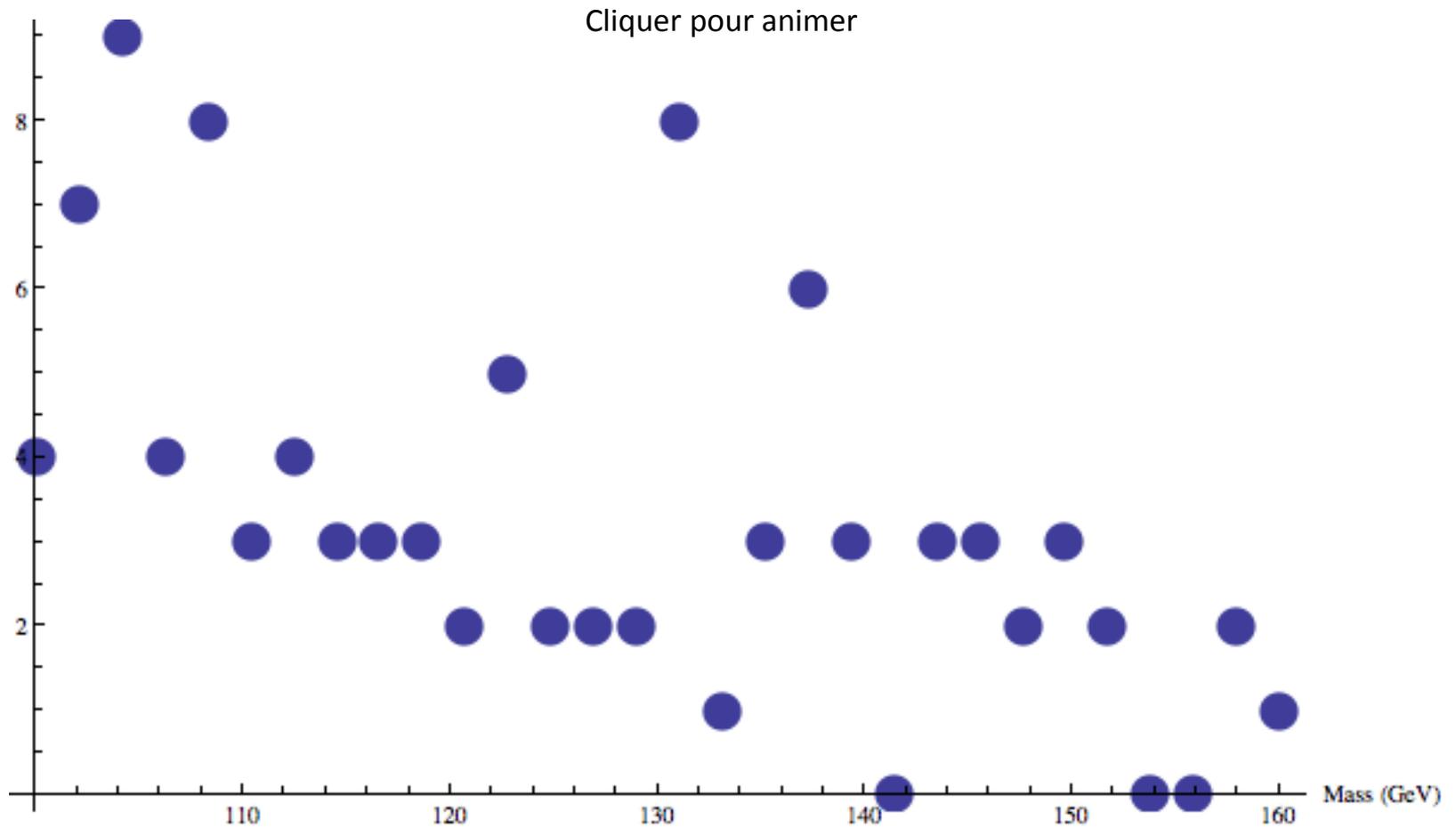
Effet de la précision du détecteur



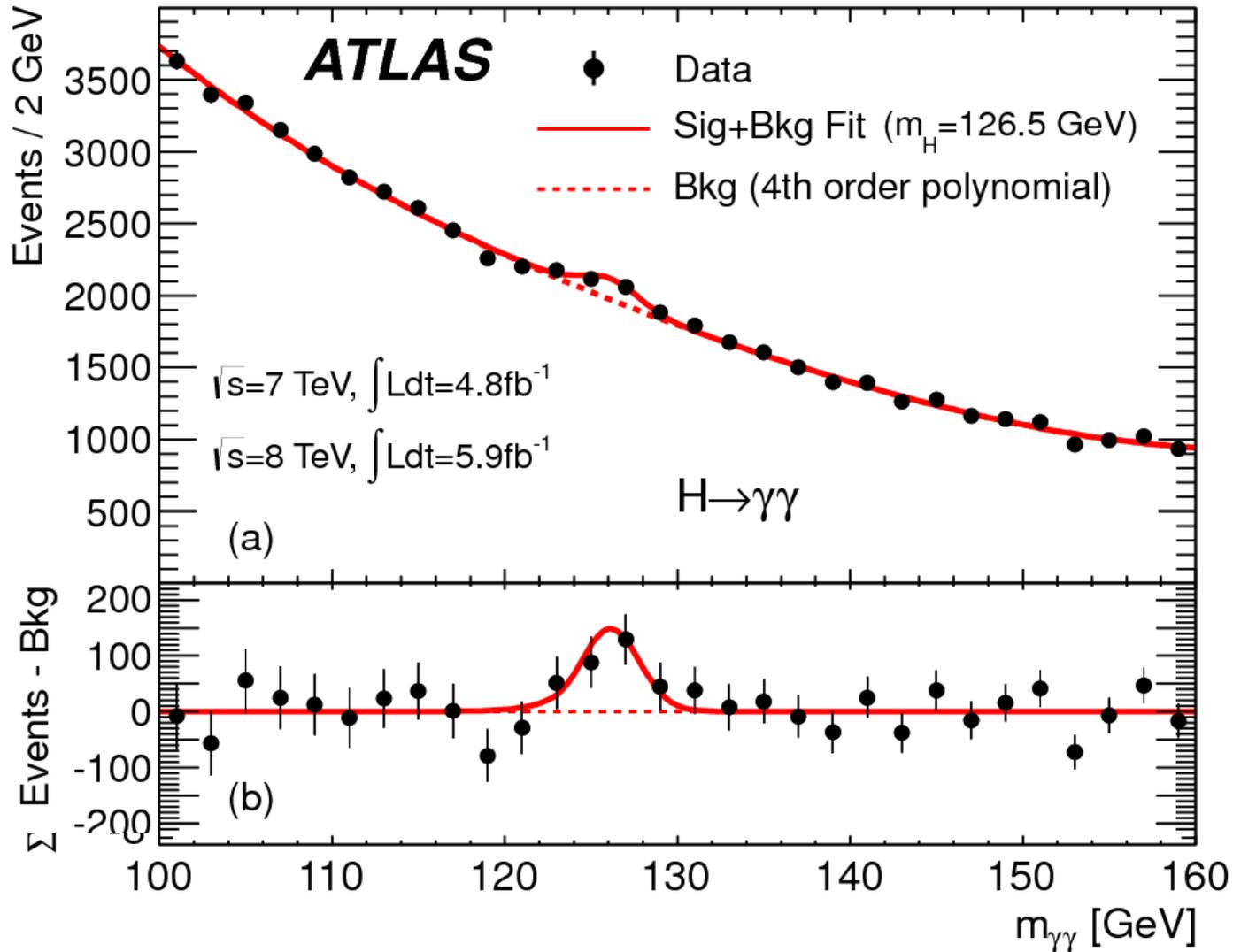
Effet du bruit de fond

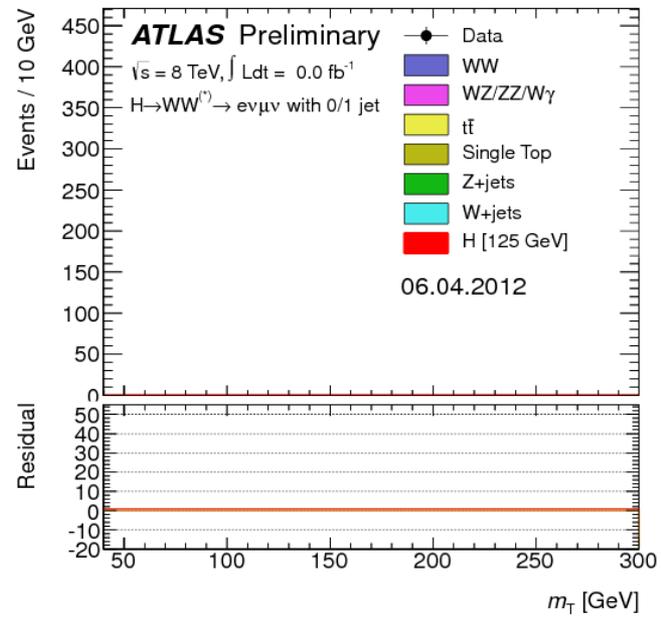
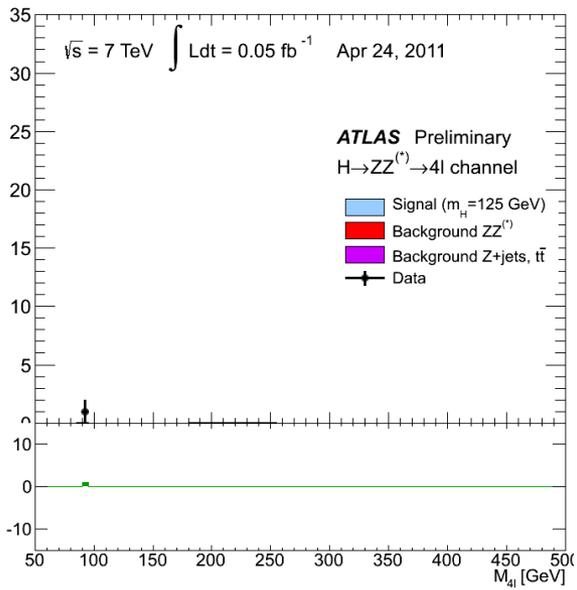
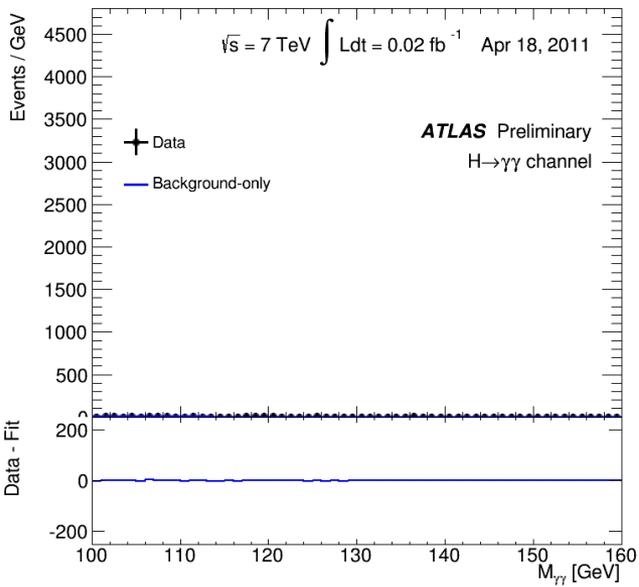


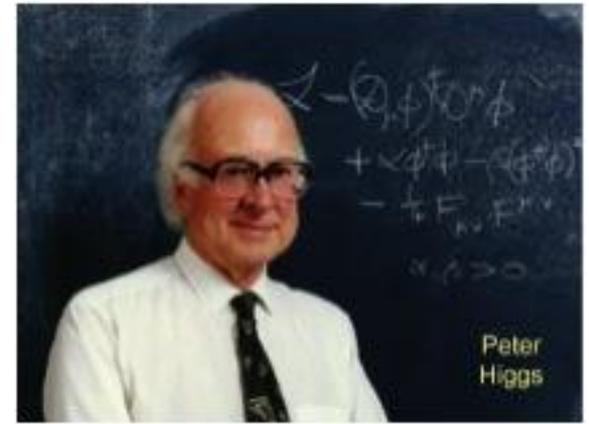
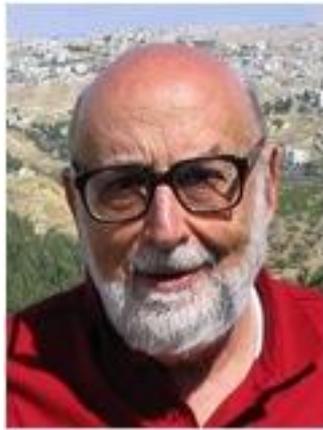
Effet de la statistique



Et maintenant « en vrai » (Juillet 2012)







Peter Higgs

Robert Brout 1928-2011

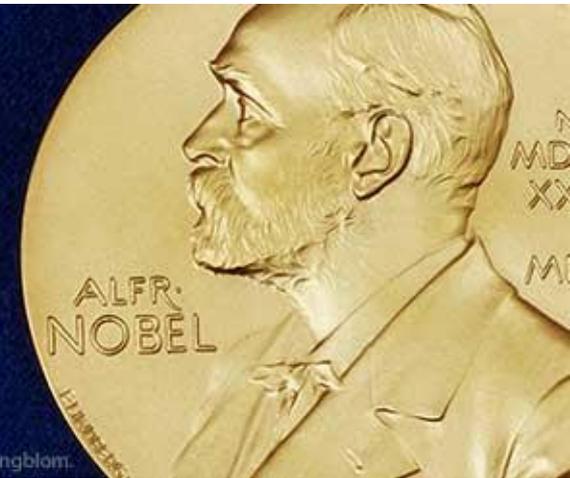
François Englert 1932-

Peter Higgs 1929-

Également : G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble,

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

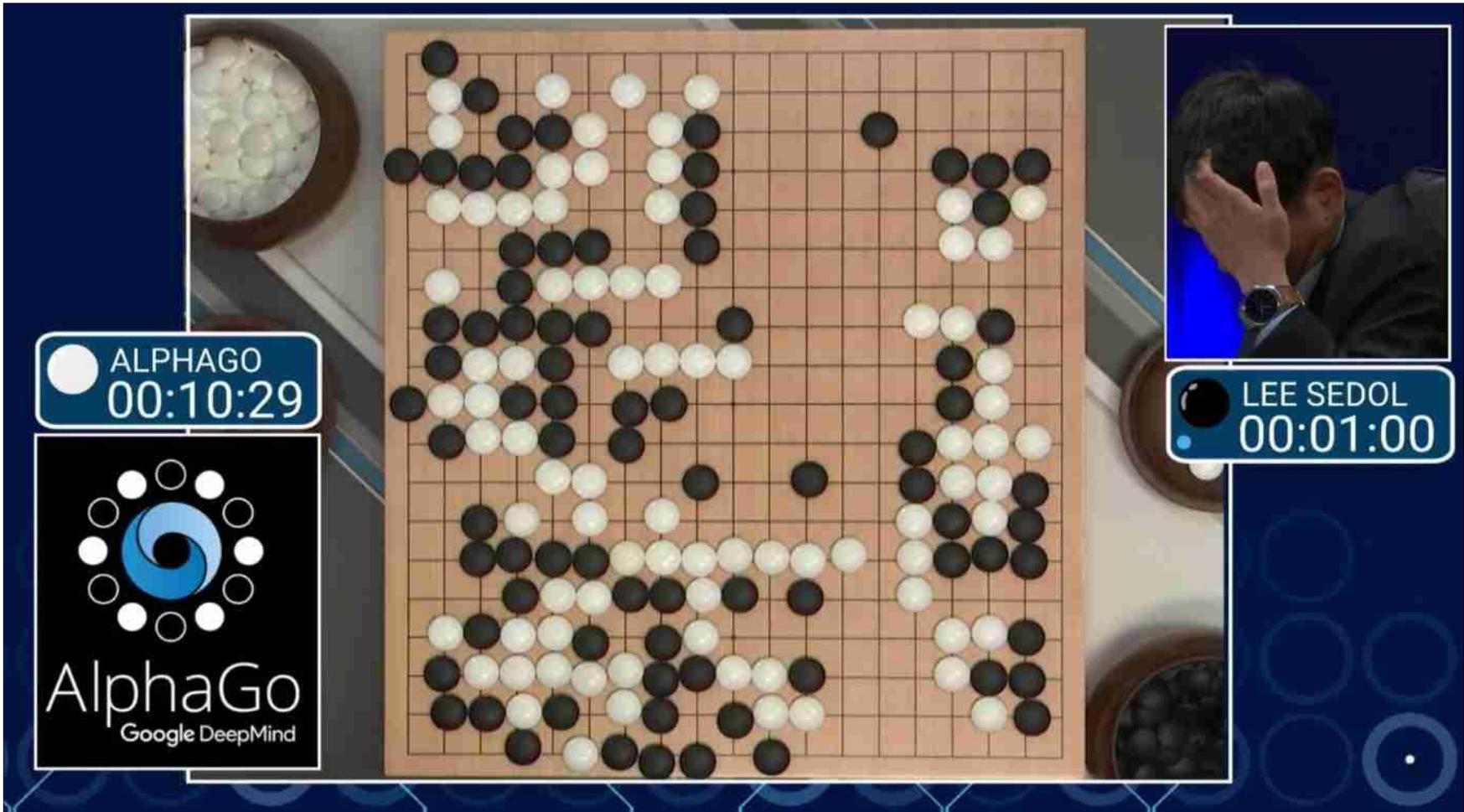
François Englert Peter W. Higgs



Champ de Higgs

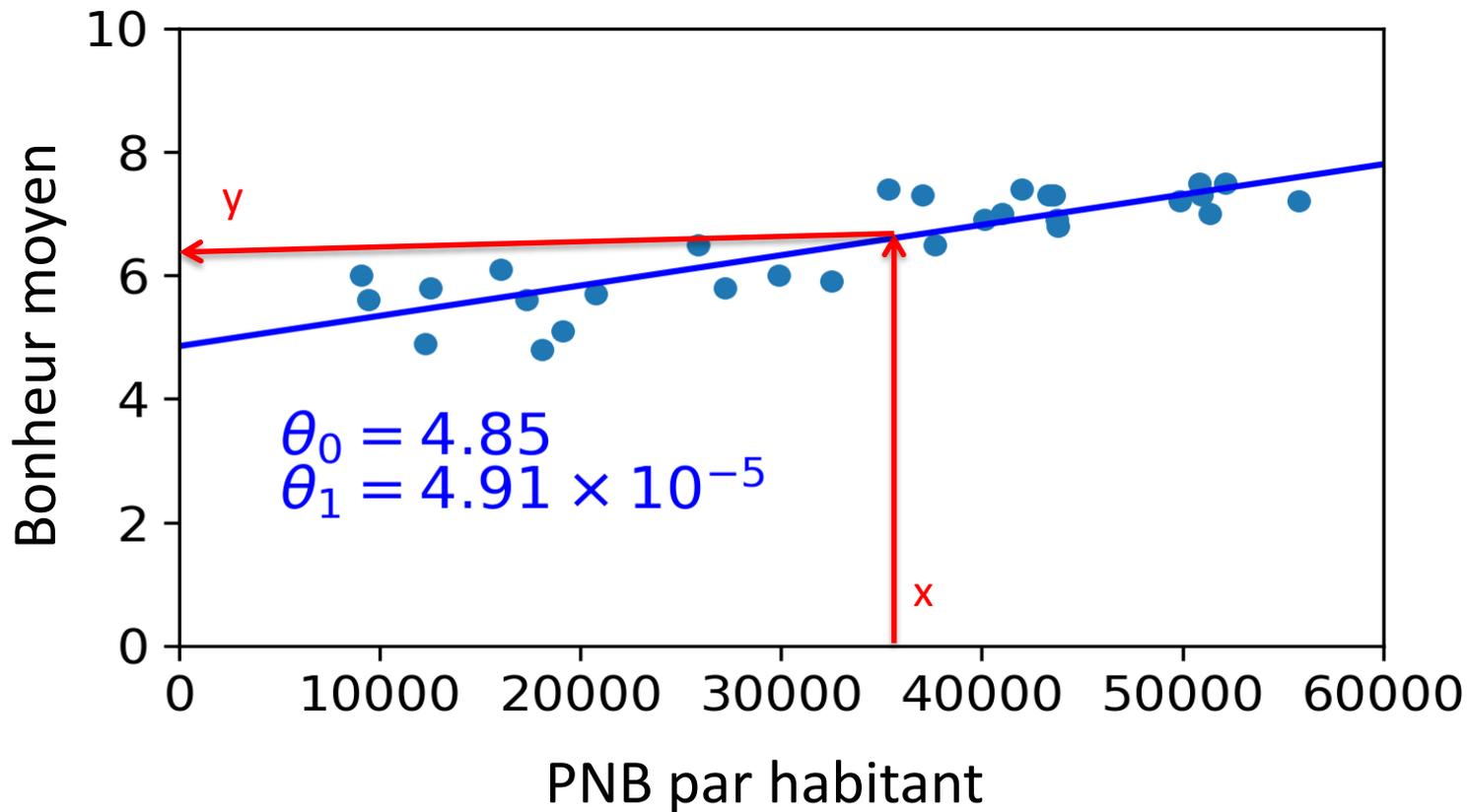
« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques, qui a récemment été confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS au grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

Intelligence Artificielle



Régression Linéaire

Boskovic, Legendre, Laplace, Gauss



$y=f(x)$

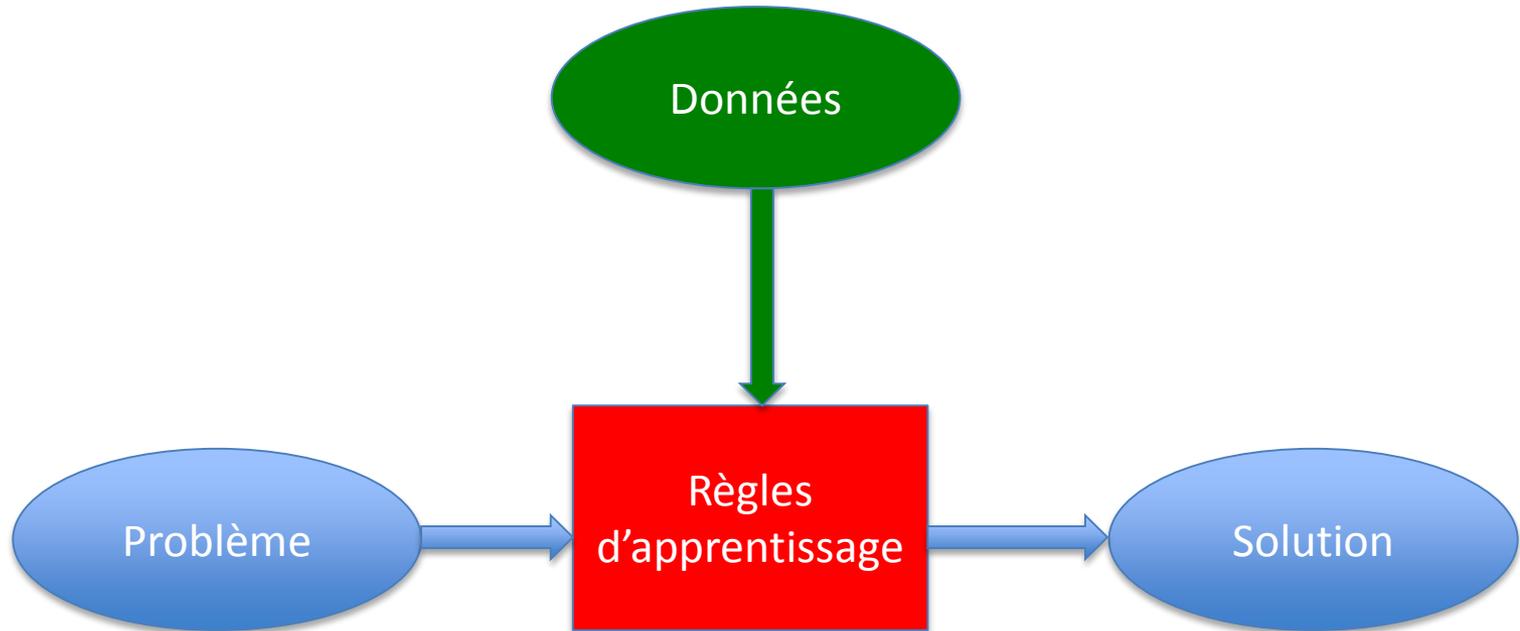
Etant donné x , on veut $y \rightarrow$ comment construire f ?

- Ecriture manuscrite \xrightarrow{f} texte y
- Photo \rightarrow maman ou mamie ?
- Image \rightarrow chien ou chat ?
- « Comment ça va ? » \rightarrow « Wie geht's ? »
- Parole \rightarrow texte
- Position des pièces \rightarrow prochain coup
- Camera + capteurs+GPS \rightarrow action sur volant
- Compte facebook \rightarrow publicité ciblée

Informatique traditionnelle

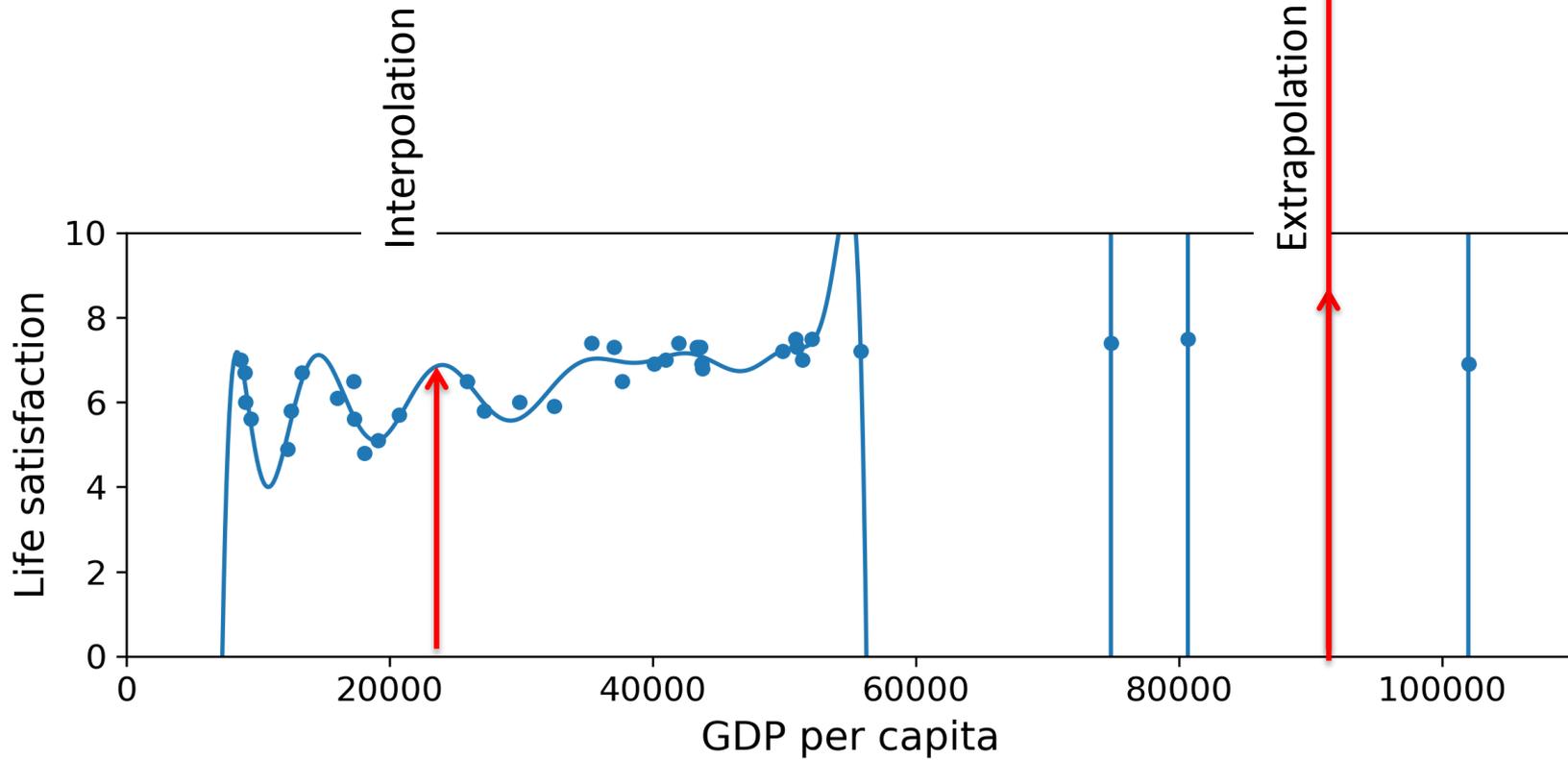


Apprentissage Automatique



Apprendre = optimiser les paramètres internes de l'algorithme : n=2 - millions

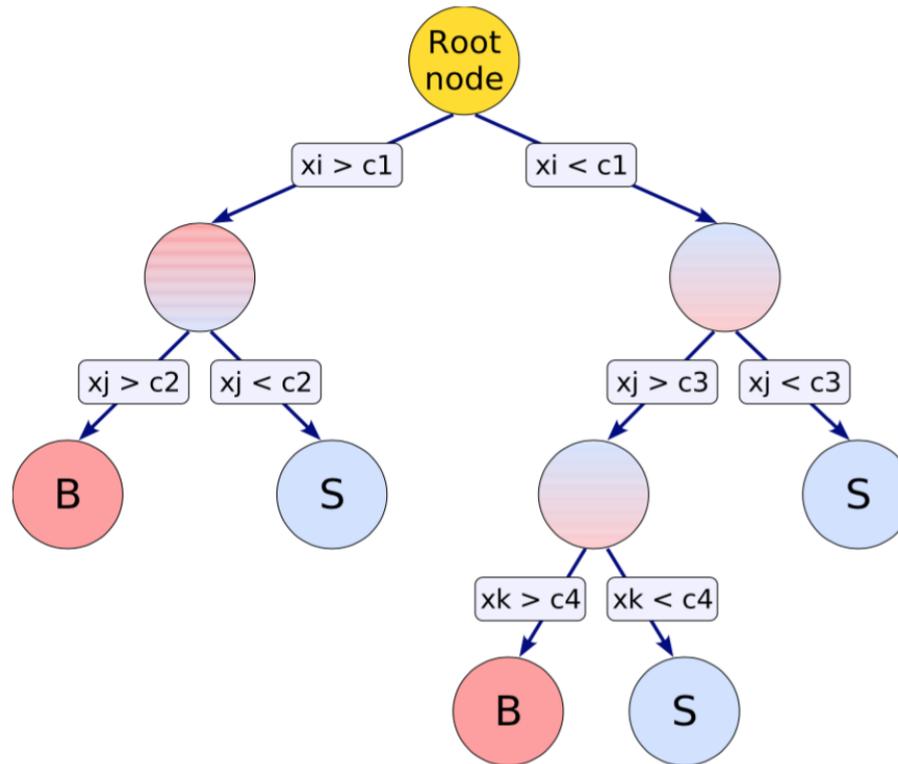
Beaucoup de pièges



Comment ça marche ?

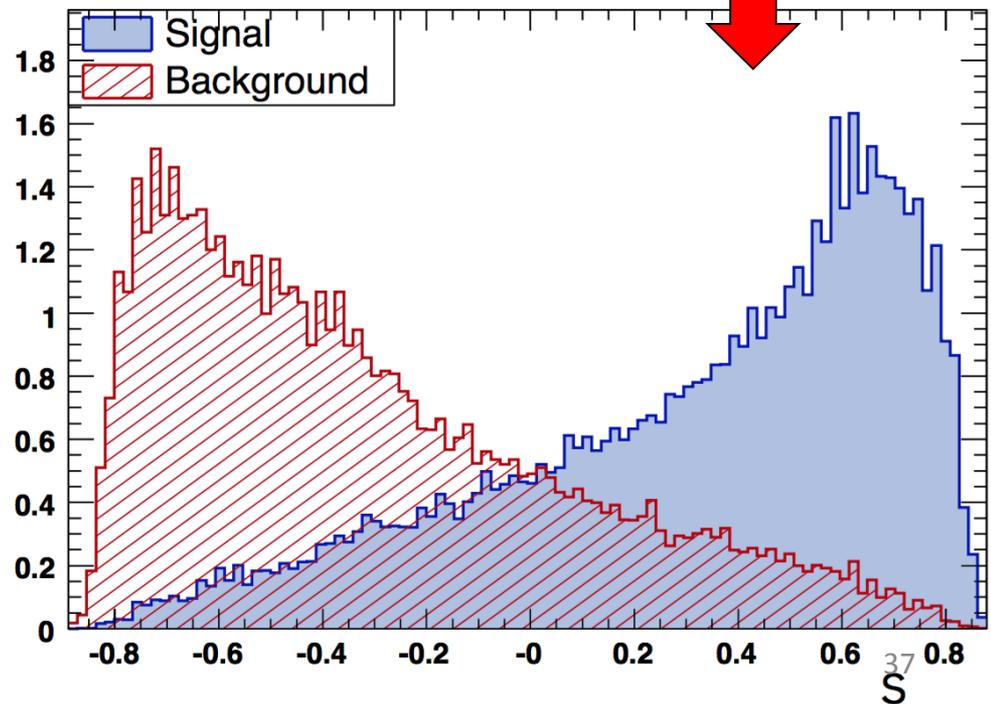
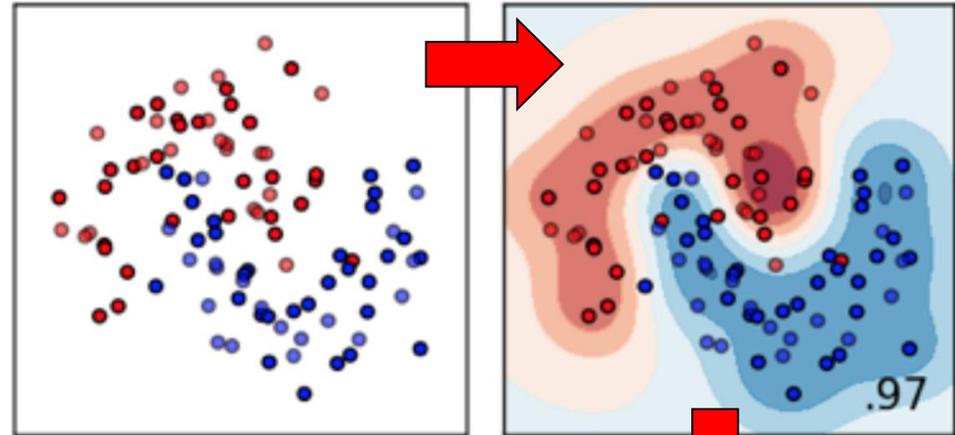
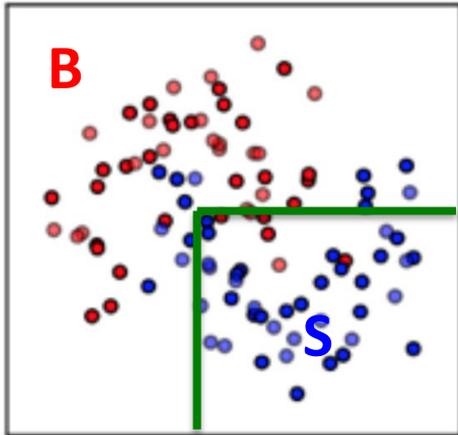
Arbre de Décision Boosté

(Boosted Decision Tree)

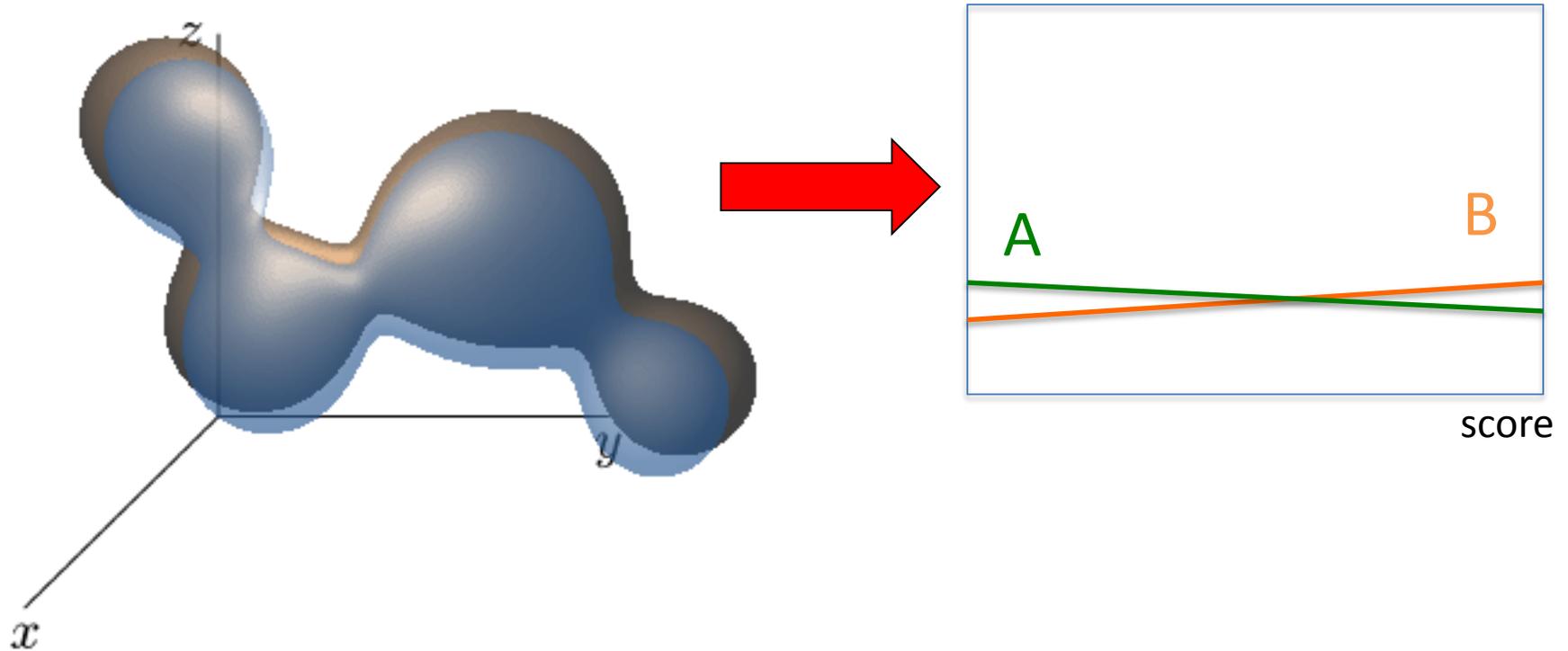


- Single tree (CART) <1980
- AdaBoost 1997 : rerun increasing the weight of misclassified entries
➔ Boosted Decision Trees (**Gradient BDT XGBoost**, random forest...)

Classifier



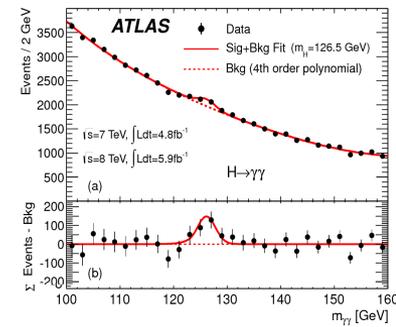
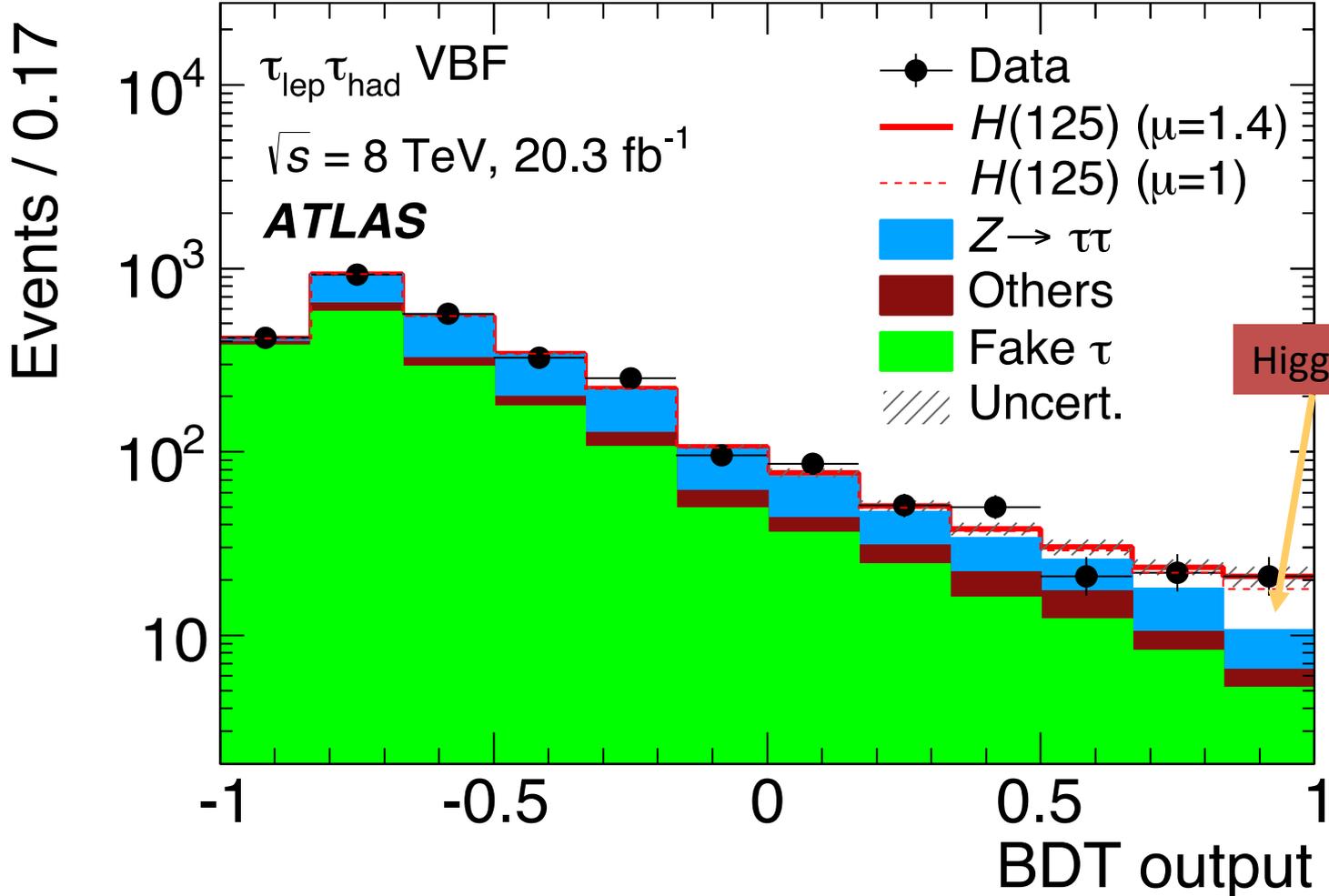
Qu'est ce qu'un classifieur fait?



- Le classifieur “projette” les deux “blobs” multidimensionnels en maximisant leur difference

Application $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$

BDT sur ~ 10 variables : masses invariantes, angles, etc...



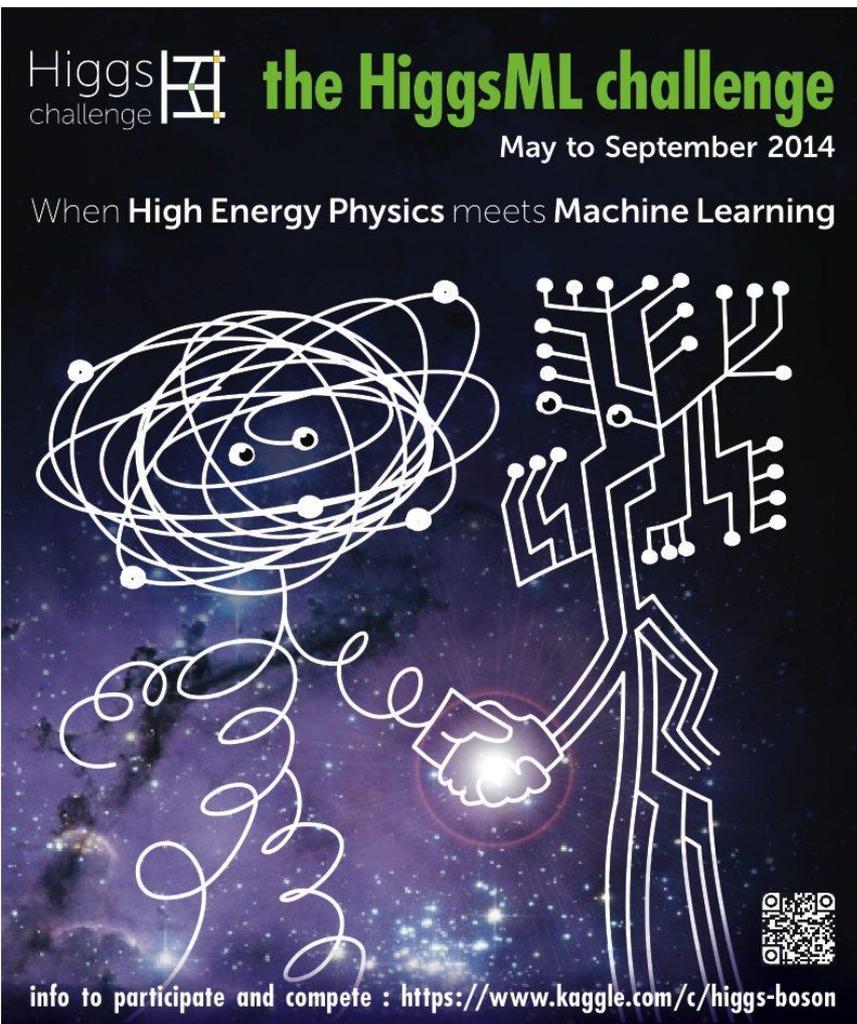
- Pour l'instant nous n'avons utilisé que les Arbres de Décision Boosté sur 10 variables
- Impact sur la sensibilité de découverte du boson de Higgs:

Analysis	Data taking year	No ML sensitivity	ML sensitivity	Relative data gain 
CMS $H \rightarrow \gamma\gamma$	2011-2012	2.2	2.7	51%
ATLAS $H \rightarrow \tau^+\tau^-$	2011-2012	2.5	3.4	85%
ATLAS $VH \rightarrow bb$	2011-2012	1.9	2.5	73%
ATLAS $VH \rightarrow bb$	2015-2016	2.8	3.0	15%
CMS $VH \rightarrow bb$	2011-2012	1.4	2.1	125%

→ équivalent à ~50% de données en plus
(le LHC a coûté 4 milliards d'euros)

Higgs Machine Learning challenge

Idée : simplifier une analyse Higgs, poster les données simulées sur le web, demander aux spécialistes de l'Intelligence Artificielle de l'améliorer



The poster features a central illustration of two figures shaking hands against a starry space background. The figure on the left is composed of white, tangled lines representing particle tracks, with a central bright spot. The figure on the right is a white circuit board with various components and connections. The text on the poster includes the title 'Higgs challenge the HiggsML challenge', the dates 'May to September 2014', the tagline 'When High Energy Physics meets Machine Learning', and a QR code in the bottom right corner. At the bottom, it provides the URL 'https://www.kaggle.com/c/higgs-boson' for more information.

Higgs challenge **the HiggsML challenge**
May to September 2014
When High Energy Physics meets Machine Learning
info to participate and compete : <https://www.kaggle.com/c/higgs-boson>



Organization committee

Balázs Kégl - *Appstar-LAL*
Cécile Germain - *IAG-LRI*
David Rousseau - *Atlas-LAL*
Glen Cowan - *Atlas-RHUL*
Isabelle Guyon - *Cholearn*
Claire Adam-Bourdarios - *Atlas-LAL*

Advisory committee

Thorsten Wengler - *Atlas-CERN*
Andreas Hoecker - *Atlas-CERN*
Joerg Stetler - *Atlas-CERN*
Marc Schoenauer - *INRIA*



Completed • \$13,000 **1,785 teams**

Higgs Boson Machine Learning Challenge

Mon 12 May 2014 – Mon 15 Sep 2014 (34 days ago)

Dashboard

Private Leaderboard - Higgs Boson Machine Learning Challenge

This competition has completed. This leaderboard reflects the final standings.

See someone using multiple accounts?

[Let us know.](#)

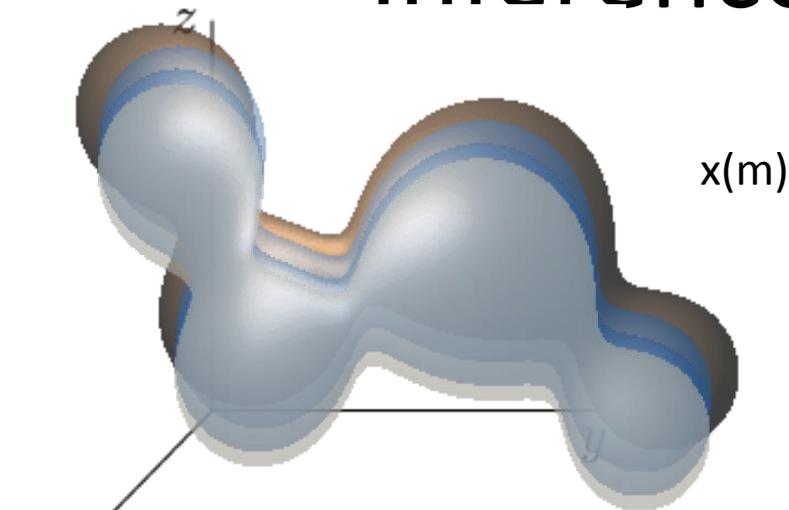
Ecart standard

#	Δ1w	Team Name ‡ model uploaded * in the money	Score 🗨	Entries	Last Submission UTC (Best – Last Submission)	
1	↑4	Gábor Melis ‡ *	7000\$	3.80581	110	Sun, 14 Sep 2014 09:10:04 (-0h)
2	↓1	Tim Salimans ‡ *	4000\$	3.78913	57	Mon, 15 Sep 2014 23:49:02 (-40.6d)
3	—	nhlx5haze ‡ *	2000\$	3.78682	254	Mon, 15 Sep 2014 16:50:01 (-76.3d)
4	↑55	ChoKo Team 🧑	3.77526	216	Mon, 15 Sep 2014 15:21:36 (-42.1h)	
5	↑23	cheng chen	3.77384	21	Mon, 15 Sep 2014 23:29:29 (-0h)	
6	↓2	quantify	3.77086	8	Mon, 15 Sep 2014 16:12:48 (-7.3h)	
7	↑73	Stanislav Semenov & Co (HSE Yandex)	3.76211	68	Mon, 15 Sep 2014 20:19:03	
8	↓1	Luboš Motl's team 🧑	3.76050	589	Mon, 15 Sep 2014 08:38:49 (-1.6h)	
9	↓1	Roberto-UCIIM	3.75864	292	Mon, 15 Sep 2014 23:44:42 (-44d)	
10	↑5	Davut & Josef 🧑	3.75838	161	Mon, 15 Sep 2014 23:24:32 (-4.5d)	

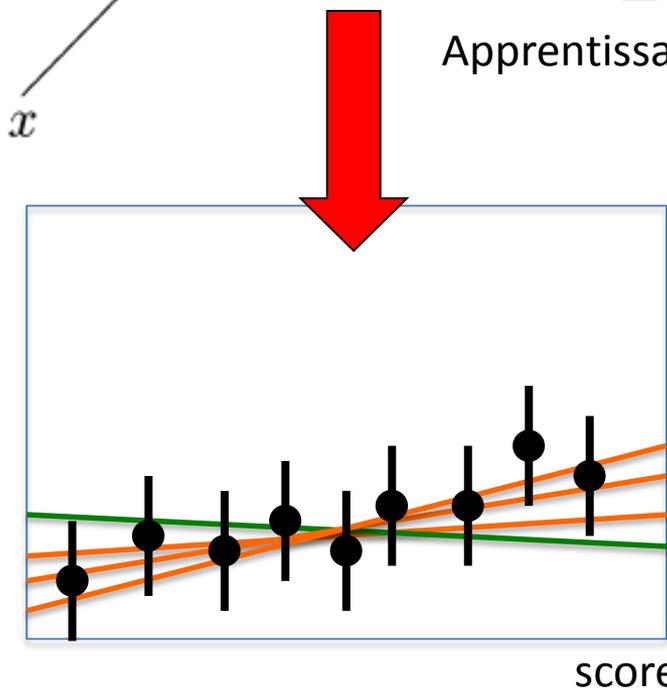
991 TMVA (CERN standard)

3.2

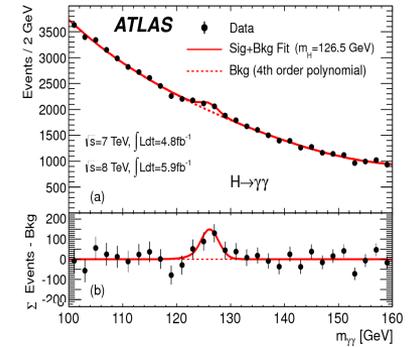
Inférence sans modèle



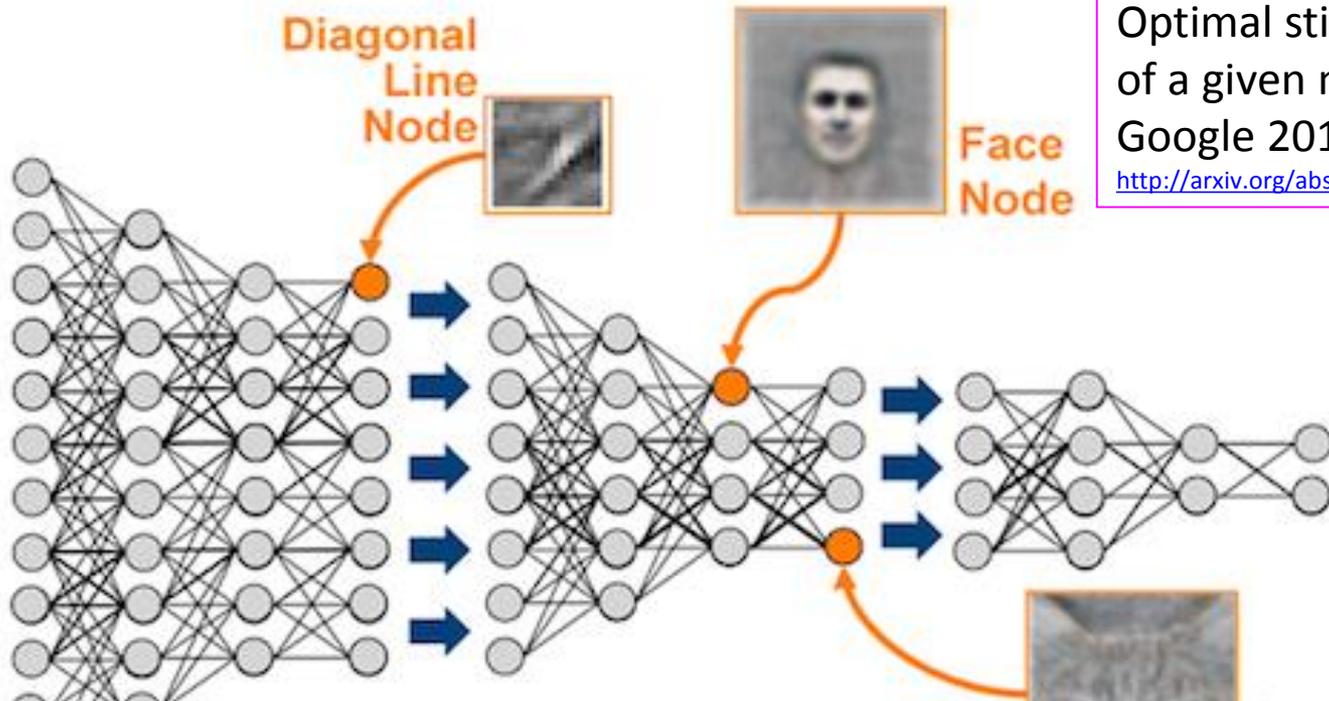
Apprentissage séparation en fonction de m



Ajuster m sur les données



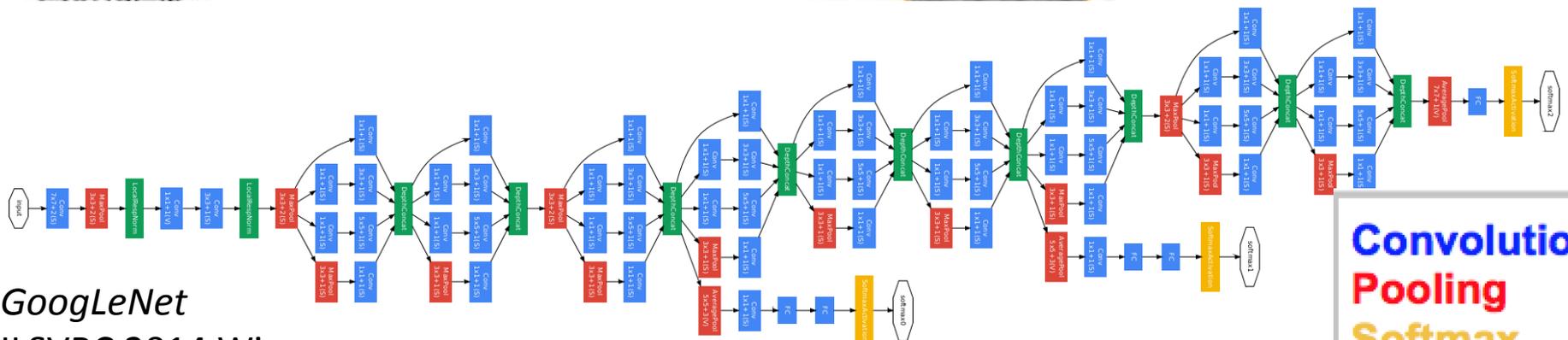
Apprentissage profond



Optimal stimulus
of a given neuron
Google 2012

<http://arxiv.org/abs/1112.6209>

~1950
1990 chiffres
manuscripts
2000 deep learning
explosion



Convolution
Pooling
Softmax
Other

GoogLeNet
ILSVRC 2014 Winner
4M parameters

Pas de miracle

- Si les fonctions de densité de probabilité (pdf) sont connues, on ne peut faire mieux que le rapport de vraisemblance (théorème de Neyman-Pearson) :

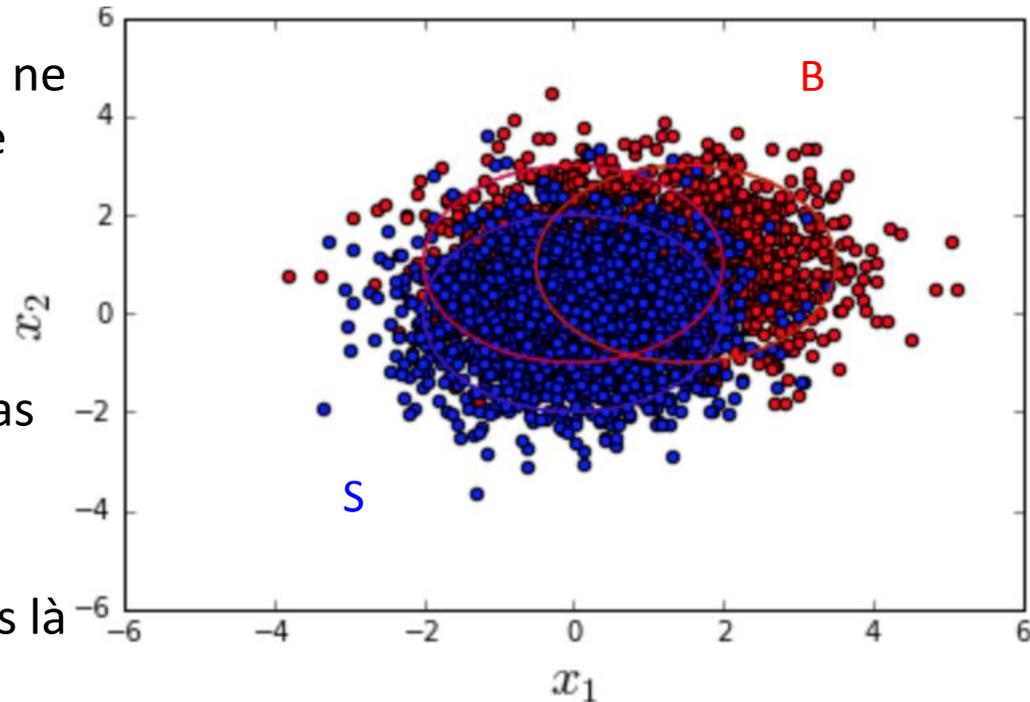
- $L_S(x)/L_B(x)$

- ❑ OK mais en général L_S L_B ne sont pas connus (même pas leur forme)

- ❑ + x de grande dimension

- ML devient intéressant dans ce cas là

- → approche mixte



Identification



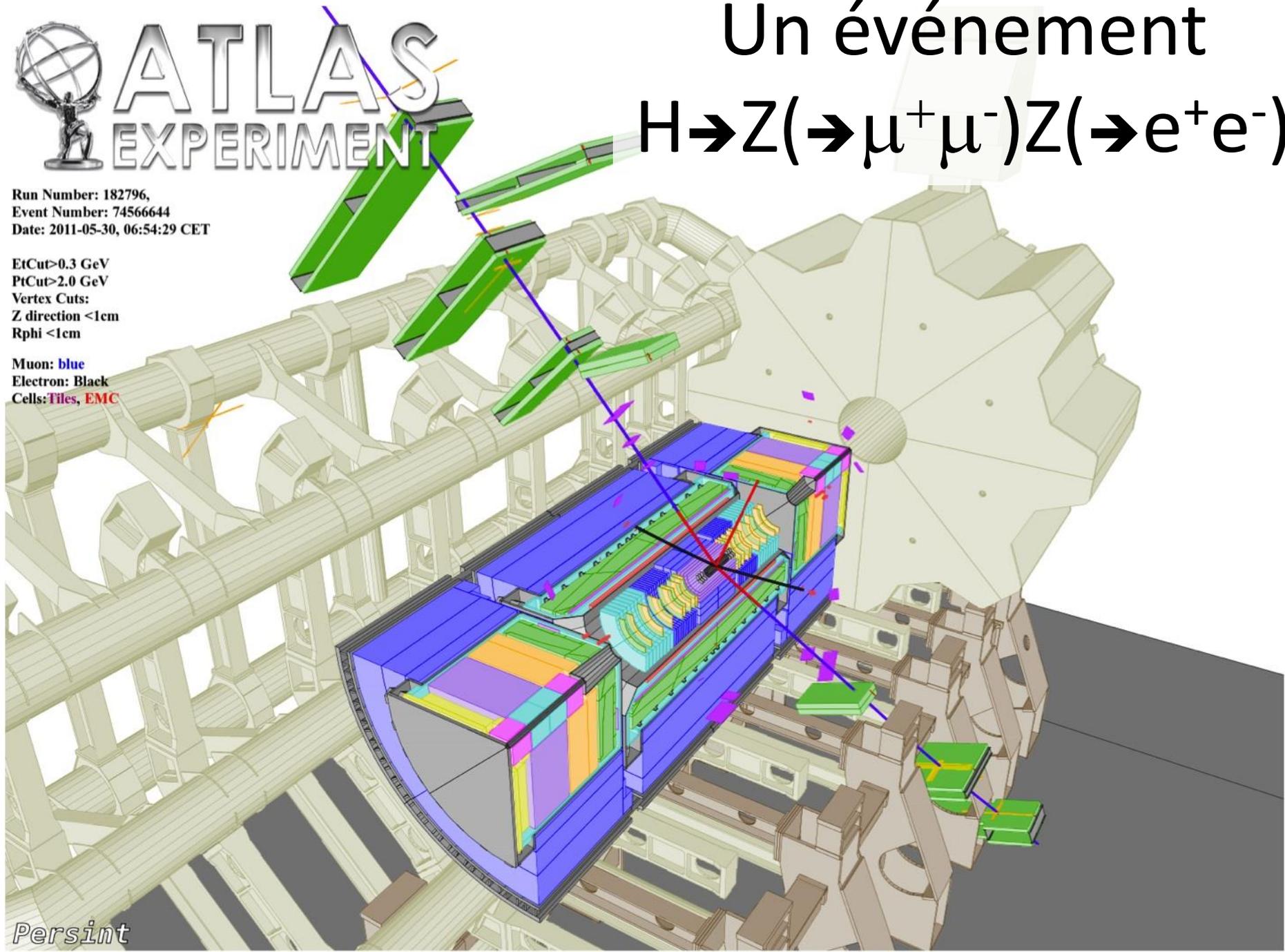
ATLAS EXPERIMENT

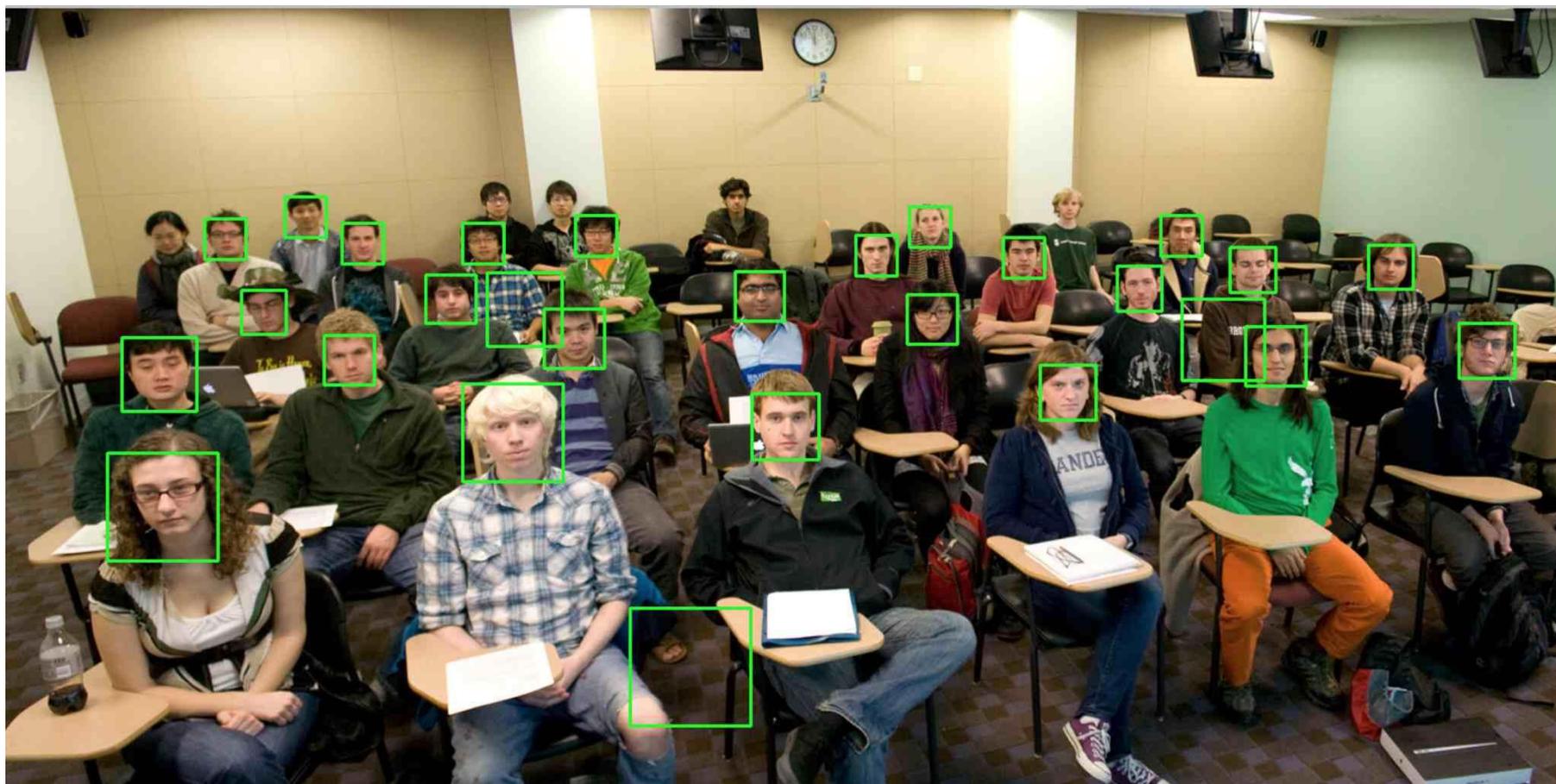
Un événement $H \rightarrow Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-) Z(\rightarrow e^+ e^-)$

Run Number: 182796,
Event Number: 74566644
Date: 2011-05-30, 06:54:29 CET

EtCut > 0.3 GeV
PtCut > 2.0 GeV
Vertex Cuts:
Z direction < 1cm
Rphi < 1cm

Muon: blue
Electron: black
Cells: Tiles, EMC





Éfficacité
Pureté
Vitesse

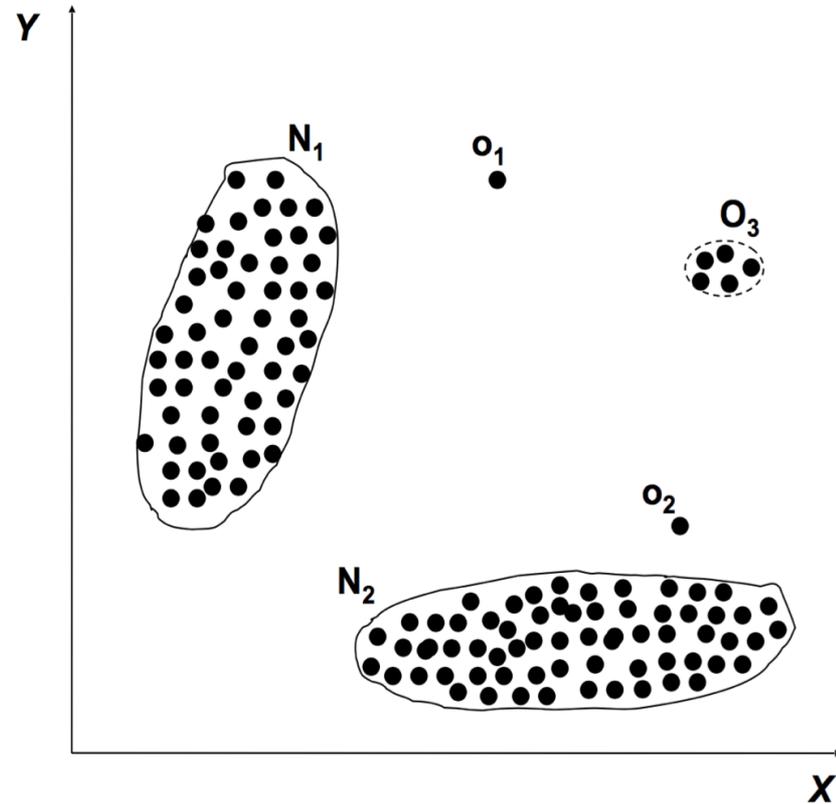
Détection d'anomalie



Détection d'anomalie

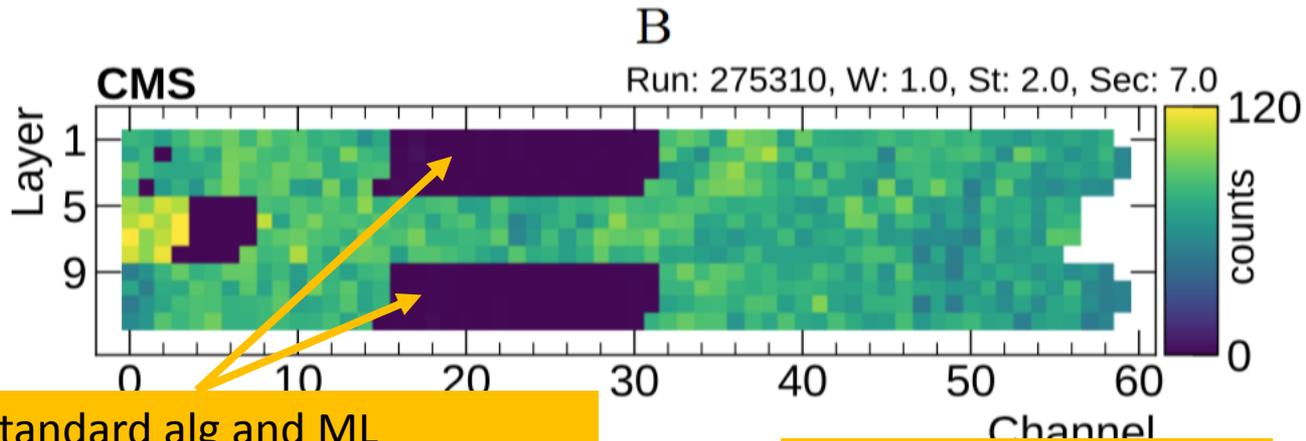
- Comment détecter les anomalies
"O"utliers par rapport aux "N"ucleus
- Méthode supervisée : on a un modèle pour N et O
- Méthode non-supervisée : pas de modèles
- Méthode semi-supervisée : modèle pour N, pas pour O

- Applications : détection de spam, détection de pannes



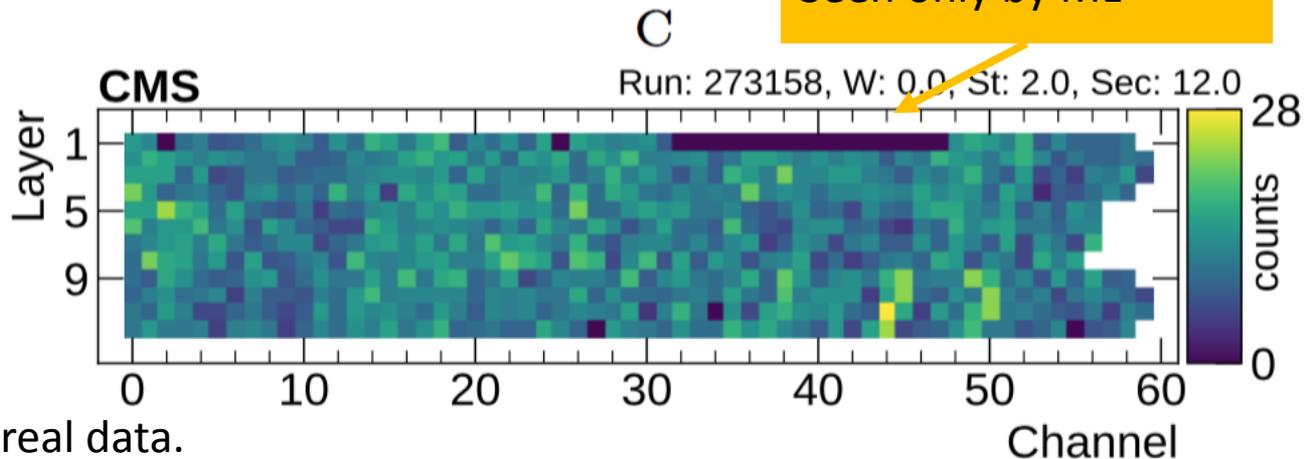
Application au monitoring

- Example application CMS muon chamber monitoring (with Con



Seen by standard alg and ML

Seen only by ML



Demo on real data.

Application à la physique



Application à la physique



Break