

THE FIFTH BIENNIAL



AFRICAN SCHOOL OF FUNDAMENTAL PHYSICS AND APPLICATIONS

University of Namibia, and
Namibia University of Science and Technology
Windhoek, Namibia
June 24 - July 14, 2018

Ogily & Mather | Namibia | www.ogilvy.com.na

Simulation in HEP Experiments

Dario Barberis

Dario.Barberis@cern.ch

(Genoa University/INFN)



Dario Barberis

- 1980-2000: travail sur la production par photons et hadrons de particules avec quarks lourds (d'abord c, après b)
- 1996-now: travail sur l'expérience ATLAS à LHC
 - Géométrie du détecteur à pixel
 - Logiciel de reconstruction des traces
 - Coordination du calcul
 - Coordination des bases de données
 - Monitoring du calcul distribué
 - Conception et développement de l'EventIndex
 - Recherche des désintégrations rares des mésons B
 - Recherche des désintégrations de particules supersymétriques avec violation de la parité "R"





Sujets

Pourquoi?

Quoi?

Comment?



Simulation

Pourquoi?

Quoi?

Comment?



Pourquoi simuler le détecteur?

- Les expériences HEP modernes sont des machines incroyablement complexes
 - Très cher et long à construire
 - Besoin de développements technologiques
 - Besoin de beaucoup de main-d'œuvre, de matériel et de ressources en espèces
 - Une fois construit, c'est pour 10 à 20 ans!
 - L'étape entre les projets de R&D et un détecteur complet est très grande
 - Habituellement 2 à 3 ordres de grandeur en taille physique et aussi en nombre de canaux de lecture
- On ne peut pas se permettre de construire un détecteur complet sans une évaluation préalable des performances mécaniques, électroniques et physiques
- La simulation complète du détecteur dans tous ses détails peut fournir des informations utiles pour guider la conception et l'optimisation du détecteur
 - Réduire autant que possible les matériaux passifs (supports, câbles, tuyaux)
 - Améliorer la résolution physique grâce à l'optimisation de la géométrie



Pourquoi simuler la physique?

- Les particules produites dans l'interaction fondamentale passent par de nombreux processus physiques avant et pendant leur détection
 - Hadronisation au point d'interaction
 - Désintégrations pour les particules instables
 - Perte d'énergie par ionisation en traversant le matériau du détecteur
 - Gerbes électromagnétiques
 - Bremsstrahlung et production de couples par interactions électromagnétiques
 - Gerbes hadroniques
 - Interactions hadroniques avec le matériau du détecteur
- Tous les détecteurs
 - collectent des signaux électriques à peu près proportionnels à l'énergie déposée dans chaque élément de détection
 - les transforment en information numérique qui peut être lue
- En fin de compte, nous devons comparer les résultats de la reconstruction d'événements avec un modèle de physique, nous devons donc simuler tous les processus énumérés ci-dessus



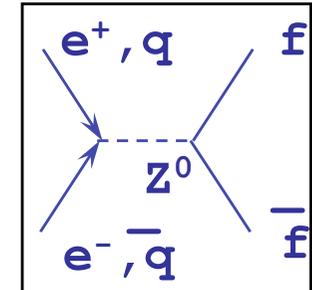
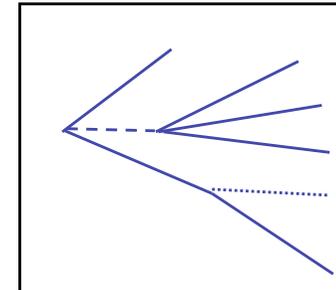
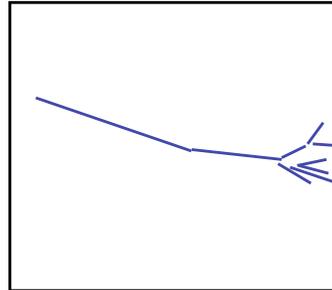
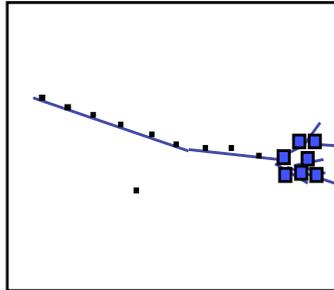
Nous avons besoin de simulation à toutes les étapes d'une expérience!

- Premières idées sur une expérience:
 - Compte tenu des objectifs de la physique, quel type de détecteurs construire et quelle performance de détecteur nous devons atteindre? Besoin de simulations brutes et rapides.
- Proposition formelle:
 - Simulation détaillée montrant la faisabilité de l'expérience proposée.
- R&D et construction:
 - Apprendre de la R & D et de la construction permet d'améliorer la simulation: la rendre plus réaliste.
 - Développer et tester des algorithmes (Calibration, reconstruction, analyse ...).
- Exploitation: quand l'expérience se déroule, la simulation est très utile:
 - Physique: Test d'algorithmes de reconstruction, études des fonds, efficacité de calcul etc...
 - Études de détecteurs: affiner la simulation pour reproduire les données, achever la compréhension ultime de la performance du détecteur, déduire des informations précieuses pour la prochaine R&D...



Des données brutes à la physique

2037	2446	1733	1699
4003	3611	952	1328
2132	1870	2093	3271
4732	1102	2491	3216
2421	1211	2319	2133
3451	1942	1121	3429
3742	1288	2343	7142



CONVERT TO
PHYSICS
QUANTITIES

APPLY
CALIBRATION,
ALIGNMENT,

PATTERN,
RECOGNITION,
PARTICLE
IDENTIFICATION

PHYSICS
ANALYSIS

RESULTS

CALIBRATION

RECONSTRUCTION

ANALYSIS

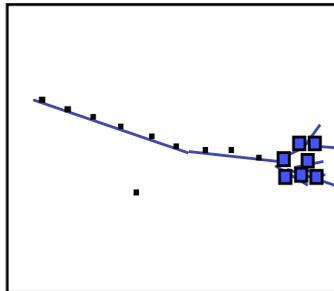
DATA PROCESSING STEPS



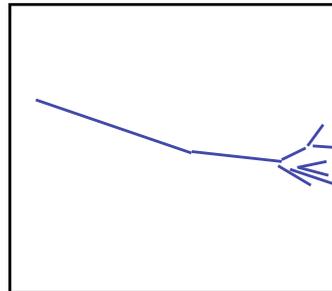
De la physique aux données brutes

2037	2446	1733	1699
4003	3611	952	1328
2132	1870	2093	3271
4732	1102	2491	3216
2421	1211	2319	2133
3451	1942	1121	3429
3742	1288	2343	7142

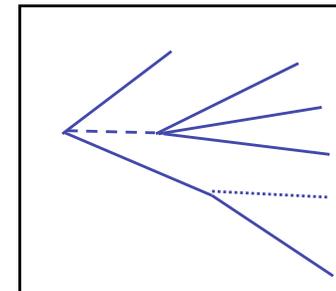
RAW DATA



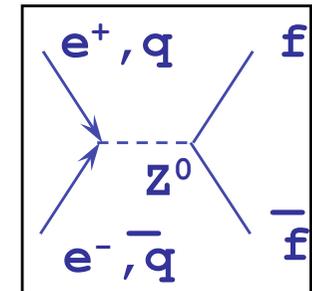
DETECTOR RESPONSE



INTERACTION WITH DETECTOR MATERIAL



FRAGMENTATION, DECAY



BASIC PHYSICS

EVENT GENERATION

DETECTOR SIMULATION

DIGITIZATION

(MONTE-CARLO) SIMULATION STEPS



Simulation

Pourquoi?

Quoi?

Comment?



Les étapes de simulation

- Génération:
 - Les générateurs simulent le processus physique nécessaire.
 - Ils produisent des particules générées.
- Interaction particules-détecteur:
 - Cette étape propage chaque particule produite dans le matériau du détecteur et simule sa perte d'énergie.
 - Il produit des pertes d'énergie pour chaque particule individuelle dans tout le matériau croisé du détecteur.
- Digitisation:
 - Cette étape simule la réponse du détecteur à partir des pertes d'énergie dans le matériau du détecteur actif.
 - Il ajoute des effets instrumentaux (bruit, cross-talk, seuils ...).
 - Il convertit l'énergie perdue en signal mesuré (charge, courant, temps ...).
 - Il produit des données dans le même format que les données réelles acquises à partir du détecteur.



Simulation

Pourquoi?

Quoi?

Comment?



Génération d'événements (1)

- C'est ce que les théoriciens appellent "simulation" ...
- C'est là que nous utilisons nos connaissances sur la physique des particules si nous simulons un processus connu.
- C'est là que nous utilisons des modèles et des théories alternatives si nous voulons vérifier leur validité dans la Nature:
 - Quel serait le signal?
 - Peut-on distinguer le signal de signaux similaires d'autres théories?
- Les générateurs peuvent être très simples. Exemple: un test de faisceau:
 - "Particle gun" (Pistolet à particules): Produit des particules du faisceau nécessaire (électrons, pions, protons ...) à une énergie et une direction donnée.
 - Ajoutez un peu de dispersion d'énergie et angulaire, le cas échéant, en fonction du faisceau réel.
- Ils peuvent être compliqués: une collision proton-proton ...



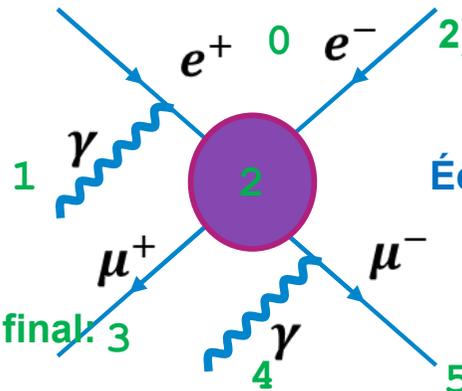
Génération d'événements (2)

- Un exemple simple: $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

- À chaque étape, des observables physiques ou des processus sont générés selon des probabilités calculées à l'aide de lois physiques:

0) Etat initial: directions des électrons et des positons, polarisation et énergie

1) Rayonnement d'état initial:
Quantum Electrodynamics
Probabilité, énergie, direction



2) Interaction et production de particules dans l'état final:
Quantum Field Theory
Échange de Z^0 et γ , ordres plus élevés...

3) Cinématique des particules d'état final:
Quantum Field Theory
Momentum, hélicités...

5) Propagation et désintégration des particules dans l'état final:
Special Relativity + Quantum Mechanics

4) Rayonnement d'état final:
Quantum Electrodynamics
Probabilité, énergie, direction



Génération d'événements (3)

- Un exemple plus compliqué: $pp \rightarrow H(\gamma\gamma) + X$
- C'est plus compliqué parce que:
 - Les protons sont des objets composites: faits de partons (quarks, antiquarks et gluons).
 - Un seul parton de chaque proton participe à la production de Higgs boson (H).
 - De nombreux scénarios d'interactions parton contribuent à la production de boson de Higgs.
 - Les partons restants interagissent doucement et produisent d'autres particules dans l'état final (X).
 - Le système X contient des partons qui vont "hadroniser" pour produire des particules dans l'état final.
- Une autre complication pour les collisionneurs de hadrons à haute luminosité (comme le LHC):
 - Les hadrons interagissent via une interaction forte: section efficace élevée (probabilité d'interaction).
 - Conséquence, dans un croisement de paquets, plusieurs collisions proton-proton individuelles se produisent.
 - La plupart de ces collisions sont «molles», comme les partons restants produisant le système X dans notre exemple. Cela ajoute plus de particules à notre système!
 - C'est appelé "pile-up" (entassement), et plusieurs techniques ont été développées pour le simuler.
- En général, les complications viennent avec les hadrons, soit dans l'état initial ou dans l'état final.



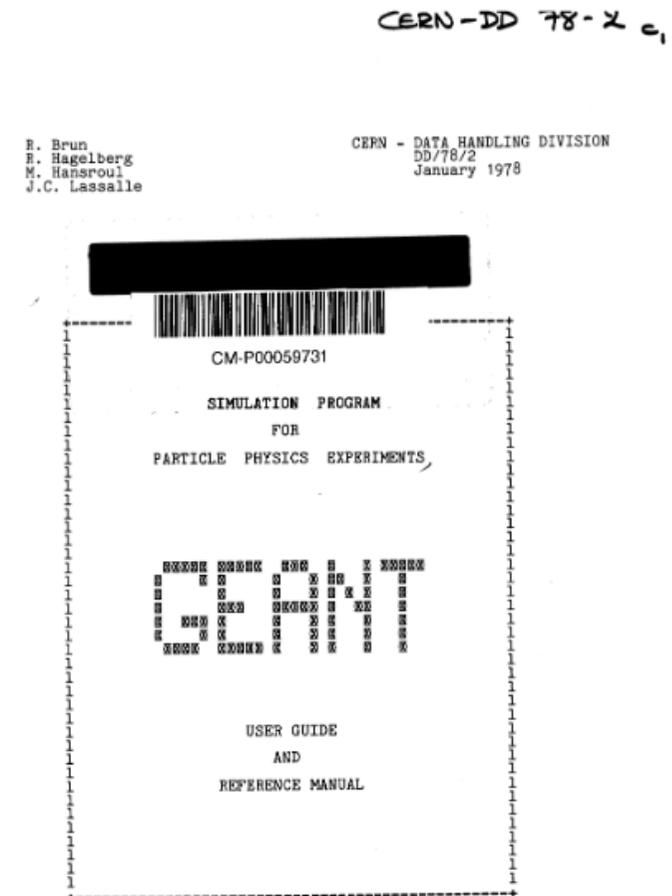
Particules et détecteurs

- Nous avons des particules du générateur de physique
 - 4-momenta de particules "stables"
 - "stable" == durée de vie $> 10^{-14}$ seconds, or $c\tau > 3 \mu\text{m}$
- Qu'est-ce qui va se passer maintenant?
 - Les particules interagissent avec le matériau du détecteur.
- De quoi avons nous besoin?
 - Description du matériau du détecteur.
 - Description des champs électriques et magnétiques.
 - Connaissance des interactions particules-matière.
- Ceci est fourni par le paquet Geant4.
 - Maintenant utilisé par toutes les expériences HEP modernes pour la meilleure correspondance entre les données simulées et réelles
 - Ou des outils de simulation similaires avec des connaissances plus ou moins spécialisées en physique ou en géométrie de détecteur



Geant4

- Le premier ensemble général de simulation du passage des particules à travers la matière a été développé au CERN à partir de 1974: GEANT.
 - Le nom historique est GEANT pour GEometry ANd Tracking.
 - Utilisé à très grande échelle dans les expériences nucléaires et de physique des particules.
 - La dernière version en Fortran est GEANT 3.21
- La collaboration CERN RD44 réécrit complètement le package en C++ en 1994-1998: Geant4.
 - Depuis lors, Geant4 est utilisé dans la plupart des expériences, ainsi que dans la science spatiale et la recherche médicale.
- Geant4 est maintenu et développé par la collaboration Geant4:
<https://geant4.web.cern.ch>
 - Beaucoup plus sur Geant4 dans la prochaine discussion et le tutoriel de cet après-midi





Digitisation

- Jusqu'à présent, nous considérons le détecteur comme un "matériau", plutôt qu'un volume actif.
 - Maintenant, nous passons à un autre type de description de détecteur: la géométrie de lecture.
- La géométrie de lecture connaît la taille et la position des canaux de détecteurs individuels.
 - Geant4 nous donne des pertes d'énergie pour les particules en mouvement, alors que les signaux des détecteurs peuvent être des courants, des charges collectées, des différences de temps etc...
- Digitisation est l'étape finale de la simulation:
 - Convertit les pertes d'énergie de Geant4 en signaux du détecteur.
 - Crée des données de détecteur dans le même format que les données réelles.
 - Contient toutes les connaissances technologiques sur le détecteur.



Exemple de Digitisation: ATLAS Pixels

Les choix:

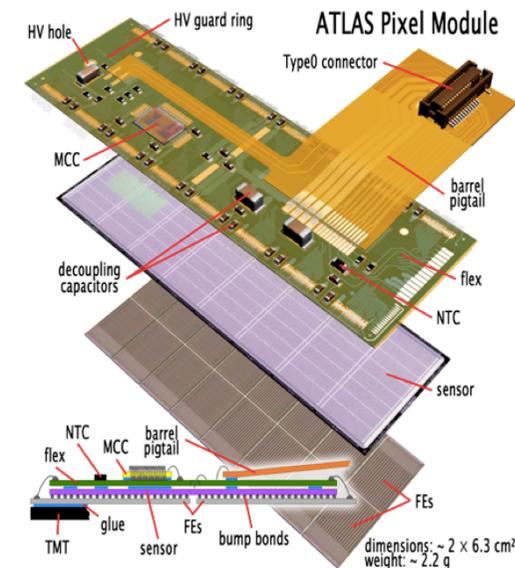
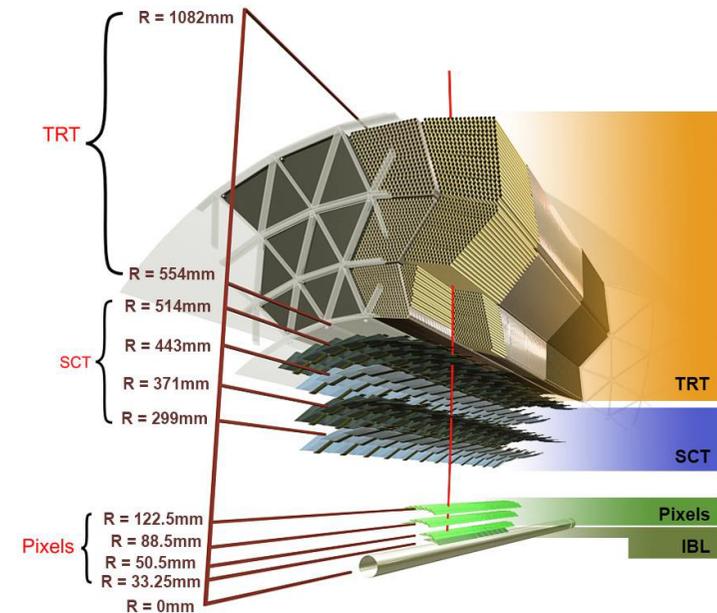
- Quatre couches cylindriques à $r = 3.3, 5.5, 9$ et 12.5 cm fermées par deux embouts ayant chacun trois disques.
- Implants n-on-n.
- Oxygen doped n type bulk.
- Senseurs planaires sauf 2×4 3D senseurs aux extrémités de la première couche de baril (IBL).
- Taille de pixel: $50 \times 250 \mu\text{m}$ en IBL et $50 \times 400 \mu\text{m}$ ailleurs.

Caractéristiques principales:

- 92 millions de canaux, 1.9 m^2 de silicium.
- 1744 modules avec 46080 canaux de lecture chacun pour les 3 couches et disques externe, lus par des puces FE-I3.
- 168 doubles modules de puces FE-I4 dans l'IBL, avec 53760 pixels chacun.
- 112 modules avec puces simples FE-I4 dans l'IBL équipés de senseurs 3D, avec 26880 pixels chacun.
- Mesure du seuil de temporisation (Time over Threshold, ToT).
- Liaisons optiques de lecture jusqu'à 160 MHz.
- Refroidissement par évaporation.
- Fonctionne à l'intérieur d'un champ magnétique uniforme de 2 T.

Histoire:

- Première version avec 3 couches de détecteurs installées dans la caverne de ATLAS en juillet 2007.
- Exploité au sein du détecteur ATLAS avec des collisions du LHC de 2009 à 2012.
- IBL installé en mai 2014.
- Détecteur à 4 couches opéré de 2015 à 2018.
- Sera exploité dans la même configuration jusqu'à 2023-2024.





Exemple de Digitisation: ATLAS Pixels

Les choix:

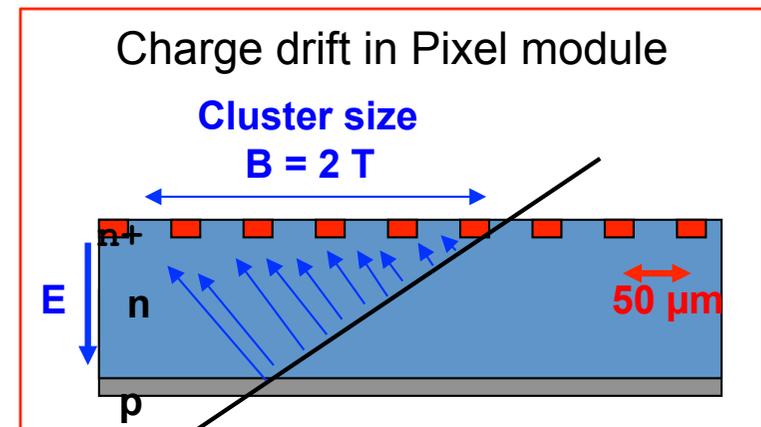
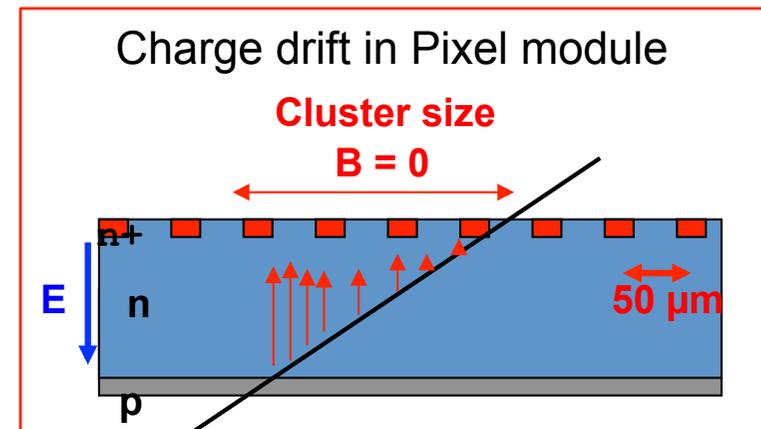
- Quatre couches cylindriques à $r = 3.3, 5.5, 9$ et 12.5 cm fermées par deux embouts ayant chacun trois disques.
- Implants n-on-n.
- Oxygen doped n type bulk.
- Senseurs planaires sauf 2×4 3D senseurs aux extrémités de la première couche de baril (IBL).
- Taille de pixel: $50 \times 250 \mu\text{m}$ en IBL et $50 \times 400 \mu\text{m}$ ailleurs.

Caractéristiques principales:

- 92 millions de canaux, 1.9 m^2 de silicium.
- 1744 modules avec 46080 canaux de lecture chacun pour les 3 couches et disques externe, lus par des puces FE-I3.
- 168 doubles modules de puces FE-I4 dans l'IBL, avec 53760 pixels chacun.
- 112 modules avec puces simples FE-I4 dans l'IBL équipés de senseurs 3D, avec 26880 pixels chacun.
- Mesure du seuil de temporisation (Time over Threshold, ToT).
- Liaisons optiques de lecture jusqu'à 160 MHz.
- Refroidissement par évaporation.
- Fonctionne à l'intérieur d'un champ magnétique uniforme de 2 T.

Histoire:

- Première version avec 3 couches de détecteurs installées dans la caverne de ATLAS en juillet 2007.
- Exploité au sein du détecteur ATLAS avec des collisions du LHC de 2009 à 2012.
- IBL installé en mai 2014.
- Détecteur à 4 couches opéré de 2015 à 2018.
- Sera exploité dans la même configuration jusqu'à 2023-2024.





Exemple de Digitisation: ATLAS Pixels

Les choix:

- Quatre couches cylindriques à $r = 3.3, 5.5, 9$ et 12.5 cm fermées par deux embouts ayant chacun trois disques.
- Implants n-on-n.
- Oxygen doped n type bulk.
- Senseurs planaires sauf 2×4 3D senseurs aux extrémités de la première couche de baril (IBL).
- Taille de pixel: $50 \times 250 \mu\text{m}$ en IBL et $50 \times 400 \mu\text{m}$ ailleurs.

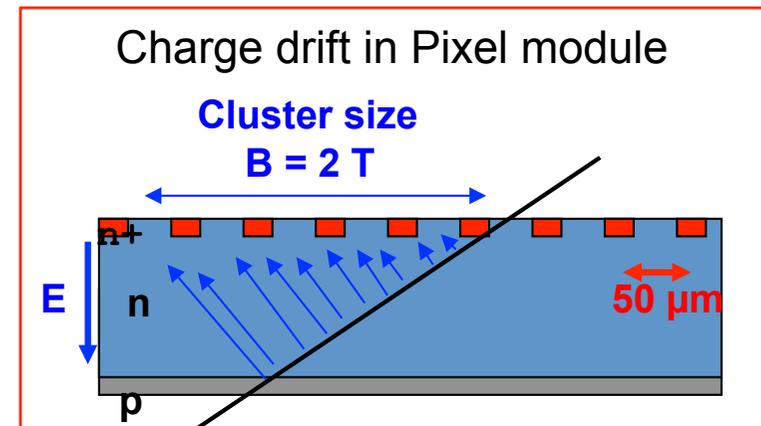
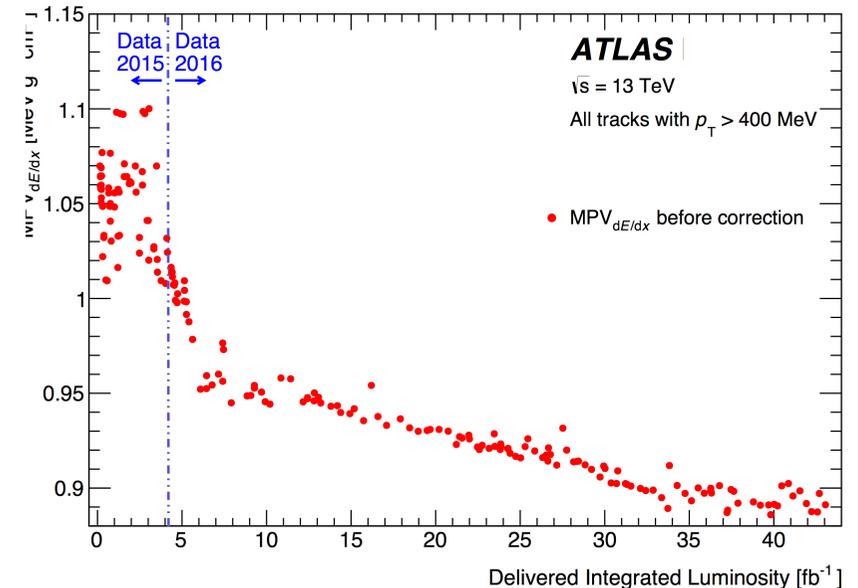
Caractéristiques principales:

- 92 millions de canaux, 1.9 m^2 de silicium.
- 1744 modules avec 46080 canaux de lecture chacun pour les 3 couches et disques externe, lus par des puces FE-I3.
- 168 doubles modules de puces FE-I4 dans l'IBL, avec 53760 pixels chacun.
- 112 modules avec puces simples FE-I4 dans l'IBL équipés de senseurs 3D, avec 26880 pixels chacun.
- Mesure du seuil de temporisation (Time over Threshold, ToT).
- Liaisons optiques de lecture jusqu'à 160 MHz.
- Refroidissement par évaporation.
- Fonctionne à l'intérieur d'un champ magnétique uniforme de 2 T.

Histoire:

- Première version avec 3 couches de détecteurs installées dans la caverne de ATLAS en juillet 2007.
- Exploité au sein du détecteur ATLAS avec des collisions du LHC de 2009 à 2012.
- IBL installé en mai 2014.
- Détecteur à 4 couches opéré de 2015 à 2018.
- Sera exploité dans la même configuration jusqu'à 2023-2024.

dE/dx vs integrated luminosity

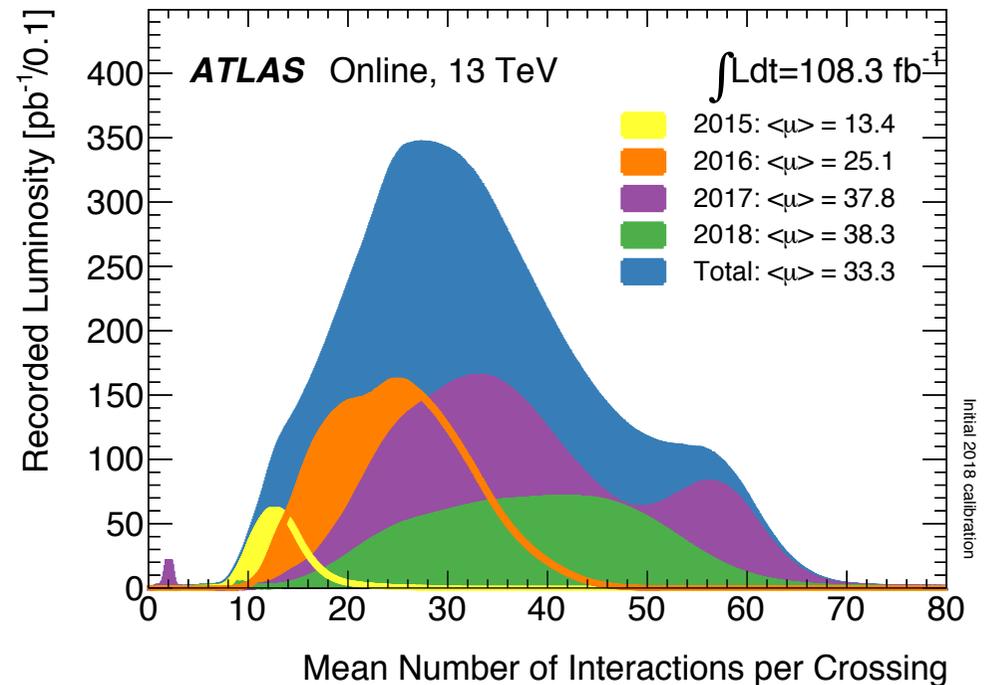
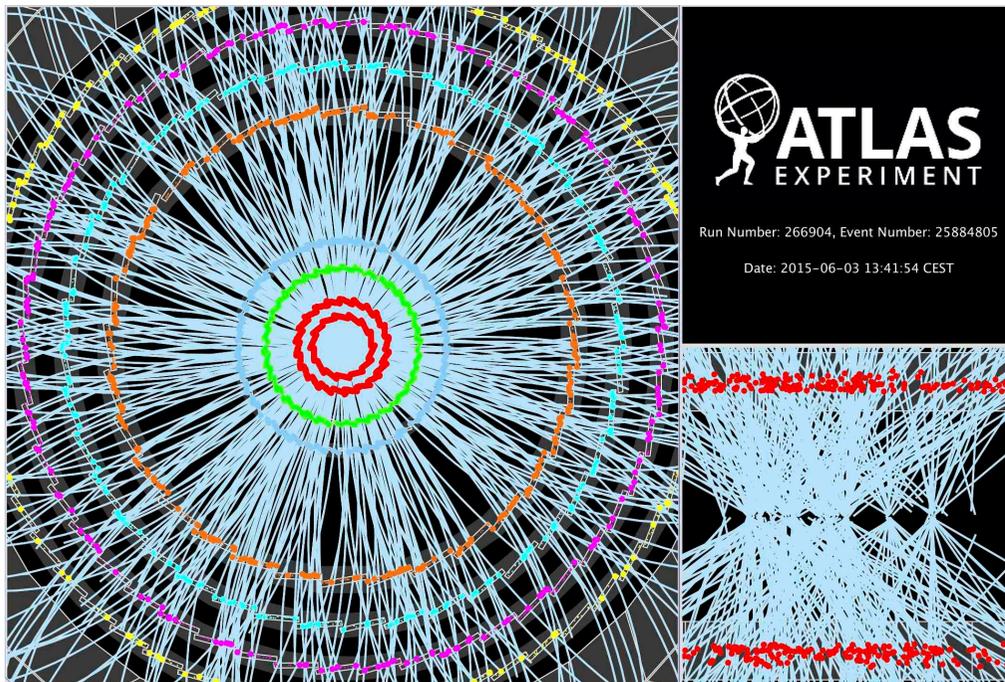




Pile-up

- Le traitement de l'empilement dépend des conditions expérimentales et des ressources informatiques à disposition
 - Choix d'ATLAS jusqu'à présent: produire une énorme «banque» d'interactions souples individuelles et les ajouter au processus dur simulé (comme la production de Higgs) pendant la digitisation
 - Une autre possibilité actuellement à l'étude est la superposition: les vrais événements de biais minimaux collectés par l'expérience sont ajoutés au processus dur simulé

Event with 17 reconstructed interaction vertices





Simulation complète vs rapide

- Avoir une suite de simulation complète qui représente le détecteur et ses propriétés dans tous les détails possibles est un must pour toute expérience HEP
 - Mais la simulation complète peut être lente dans l'exécution!
 - Le temps de suivi est dominé par le calcul de la distance entre n'importe quel point dans l'espace et la prochaine surface à franchir lors de chaque étape de suivi
 - Les caractéristiques du détecteur peuvent avoir des tailles de quelques microns - imaginez le nombre d'étapes pour chaque particule qui traverse le détecteur ATLAS
- Des simulations plus rapides peuvent être créées en prenant quelques paramétrisations de
 - Géométrie: remplacer les volumes minces par des plans ou des cylindres (même masse!)
 - Physique: introduire des paramétrisations pour les gerbes électromagnétiques et/ou hadroniques
 - Digitisation: paramétriser la réponse du détecteur en fonction des distributions de perte d'énergie dans des groupes de éléments de détection voisins
- En tout cas, il ne faut pas compromettre la qualité de la physique
 - Quelques astuces peuvent être appliquées:
 - par exemple, tracer les particules du processus d'interaction primaire à travers la simulation complète, et l'événement sous-jacent et l'empilage par simulation rapide



Merci pour votre attention!

Questions?