

Comment la future phase de haute luminosité du collisionneur LHC du CERN, qui doit permettre l'étude des interactions du boson de Higgs, bouscule notre façon de calculer

Catherine Biscarat et Sylvain Caillou
Laboratoire des 2 Infinis - Toulouse (L2IT)

catherine.biscarat@l2it.in2p3.fr, sylvain.caillou@l2it.in2p3.fr



Séminaire SFP de la section Midi-Pyrénées, 29 octobre 2021

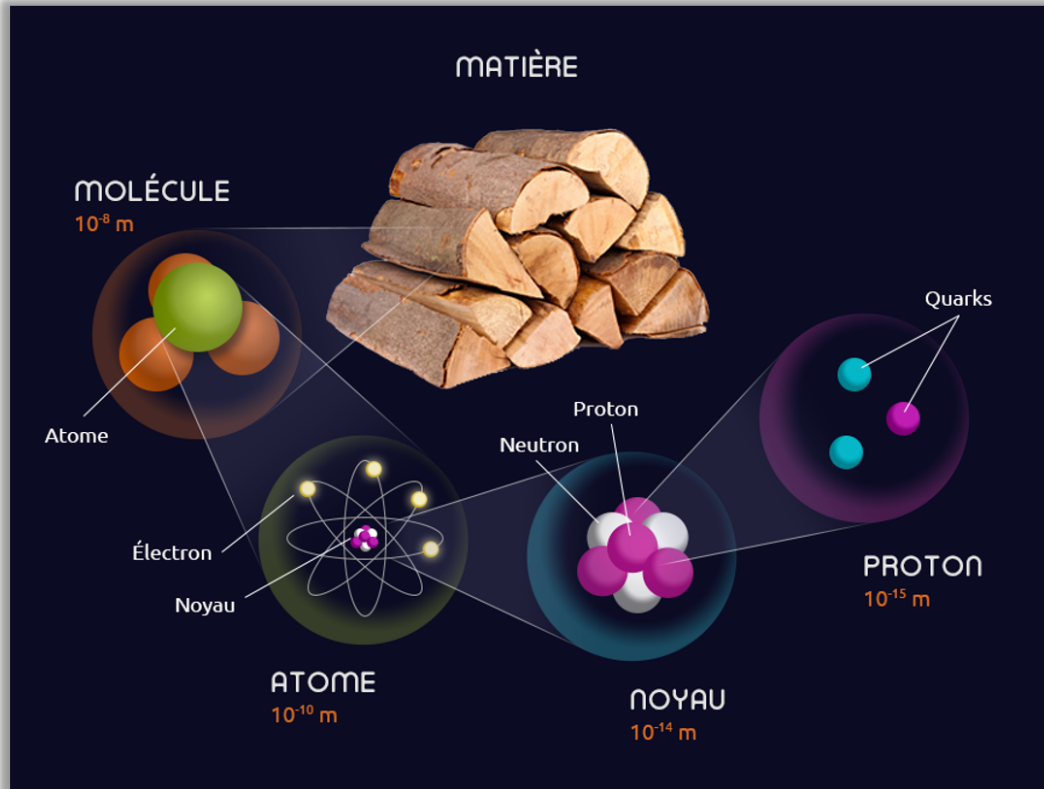
Les orateurs

- Catherine, ingénieur en informatique au CNRS
 - Physicienne en physique des particules de formation
 - Ancien directeur technique de la grille de calcul pour le LHC en France
 - Membre du comité scientifique du CERN (LHCC) pour le suivi des expériences et du *computing* au LHC, et la préparation du HL-LHC
- Sylvain, ingénieur en informatique au CNRS
 - A rejoint le L2IT depuis l'INS2I/CNRS (Institut des sciences de l'information et de leurs interactions)
 - Spécialiste des algorithmes d'intelligence artificielle et des bibliothèques associées
 - Formateur en *machine learning* à l'IFSM (formation CNRS Île de France)

La physique des particules et le boson de Higgs

- Comprendre les constituants fondamentaux de la matière et les interactions qui les régissent

Séminaire SFP MP, Jan Stark (L2IT), déc. 2019



Modèle standard de la physique des particules

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{Dirac} + \mathcal{L}_{mass} + \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{Higgs/\psi} \quad (1)$$

Here,

$$\mathcal{L}_{Dirac} = i\bar{\psi}_L \not{\partial} \psi_L + i\bar{\psi}_L \not{\partial} \psi_R + i\bar{\psi}_R \not{\partial} \psi_L + i\bar{\psi}_R \not{\partial} \psi_R + i\bar{\psi}_L \not{\partial} \psi_R + i\bar{\psi}_R \not{\partial} \psi_L \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{mass} = -v (\lambda_e \bar{e}_L e_R + \lambda_u \bar{u}_L u_R + \lambda_d \bar{d}_L d_R + \text{h.c.}) - M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{M_Z^2}{2 \cos^2 \theta} Z_\mu Z^\mu \quad (3)$$

Cette équation peut être déduite à partir de :

- considérations de symétrie,
- et du mécanisme de Higgs.

Concrètement, le modèle standard est une théorie quantique des champs qui respecte la symétrie suivante :

$$G = SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$$J_A^\mu = (-1) \bar{e} \gamma^\mu e + \left(\frac{2}{3}\right) \bar{u} \gamma^\mu u + \left(-\frac{1}{3}\right) \bar{d} \gamma^\mu d \quad (8)$$

Au cours des années 60 et 70, un modèle qui décrit l'ensemble des particules fondamentales et leurs interactions a été mis au point : le « modèle standard ».

Voici l'équation qui résume ce modèle (son « lagrangien »).

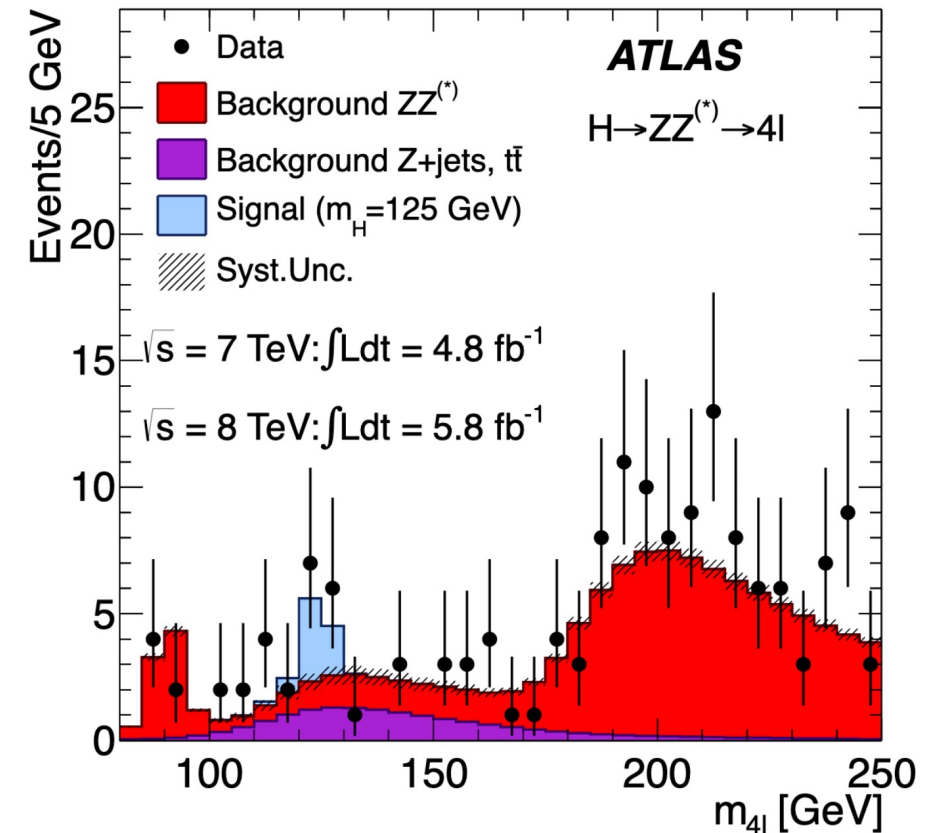
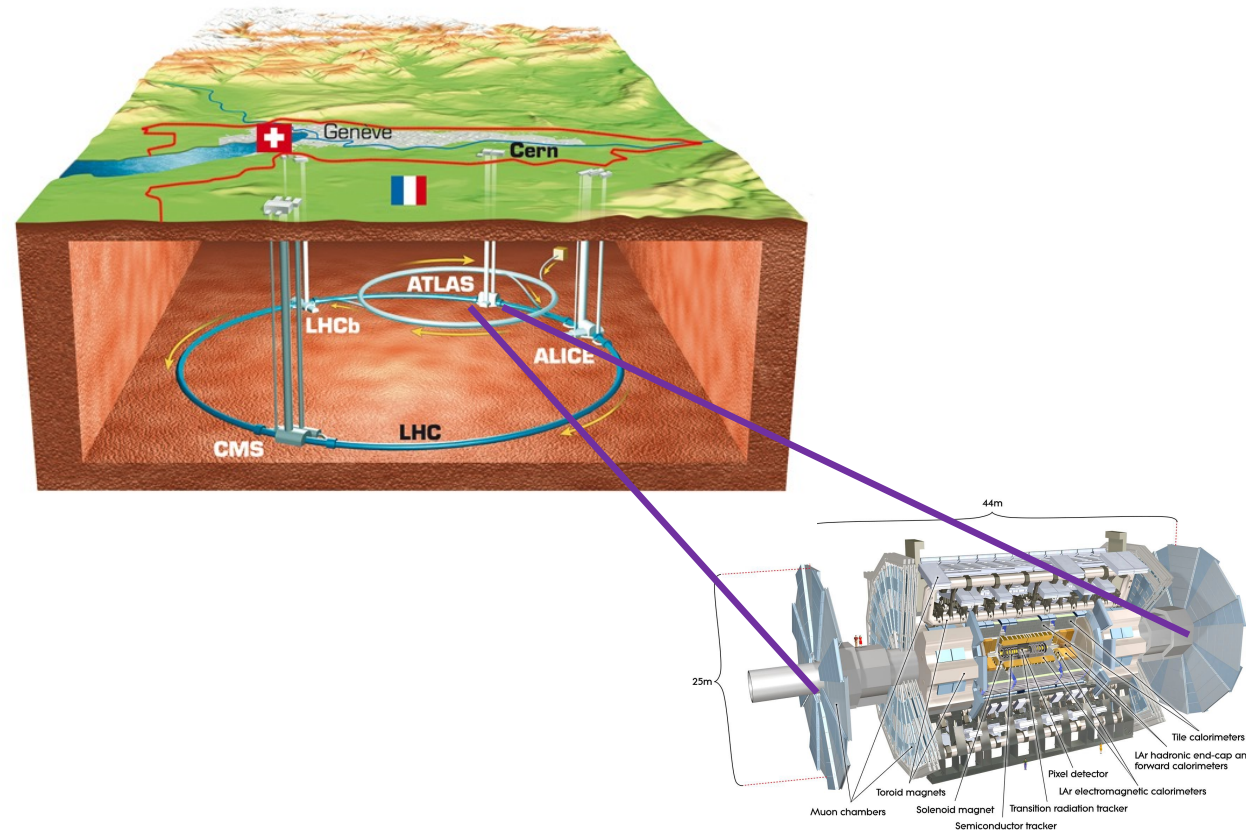
Le LHC et la découverte du boson de Higgs

Le Grand Collisionneur de Hadrons au CERN (LHC)

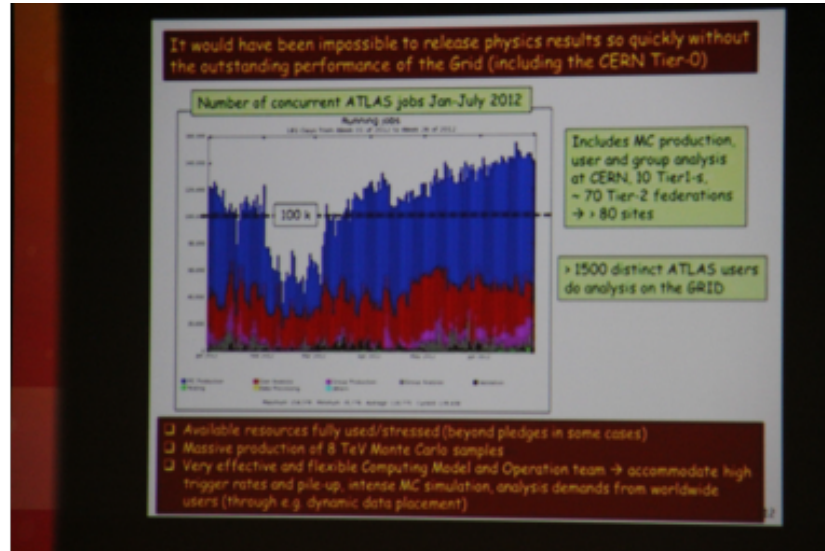
- Voir petit -> grande énergie
- Signaux rares -> haute fréquence de collisions (40 MHz)
- Equipés de deux détecteurs généralistes

Découverte du boson de Higgs (2012)

- Expérience de comptage en intervalles de masse
- Comparaison à la prédiction théorique
- $H \rightarrow 4$ leptons



« Computing enables physics »



Photography: C. Biscarat



Announce de la découverte du maillon manquant de notre Modèle Standard, le boson de Higgs.

CERN seminar, July 4th 2012, retransmitted at ICHEP (Melbourne)

Un modèle informatique construit à notre image

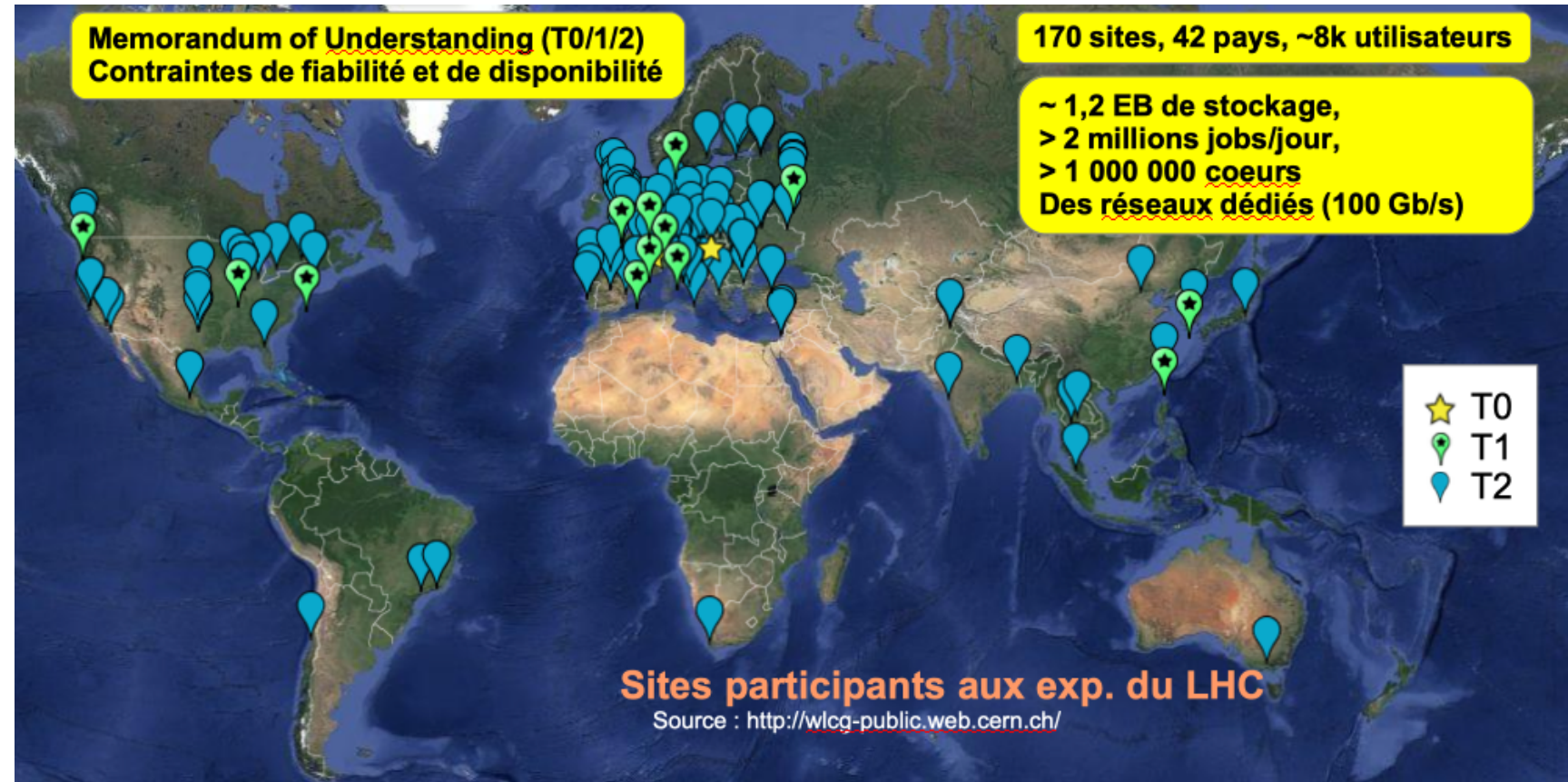


La préparation du LHC (dans les années 2000)

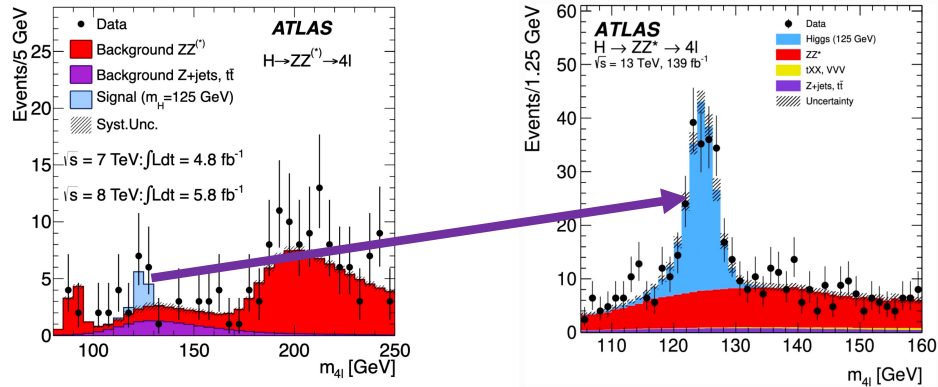
- Estimations : ~15 PB de données / an
- Des milliers d'utilisateurs finaux
- De petits événements indépendants -> traitement séquentiel
- La loi de Moore était valable

Création d'une infrastructure mondiale fédérée

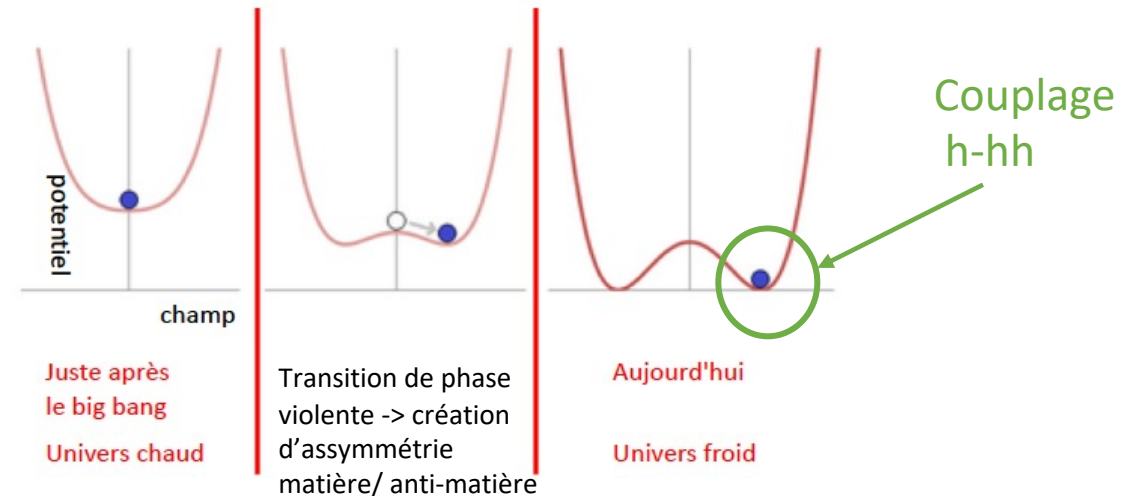
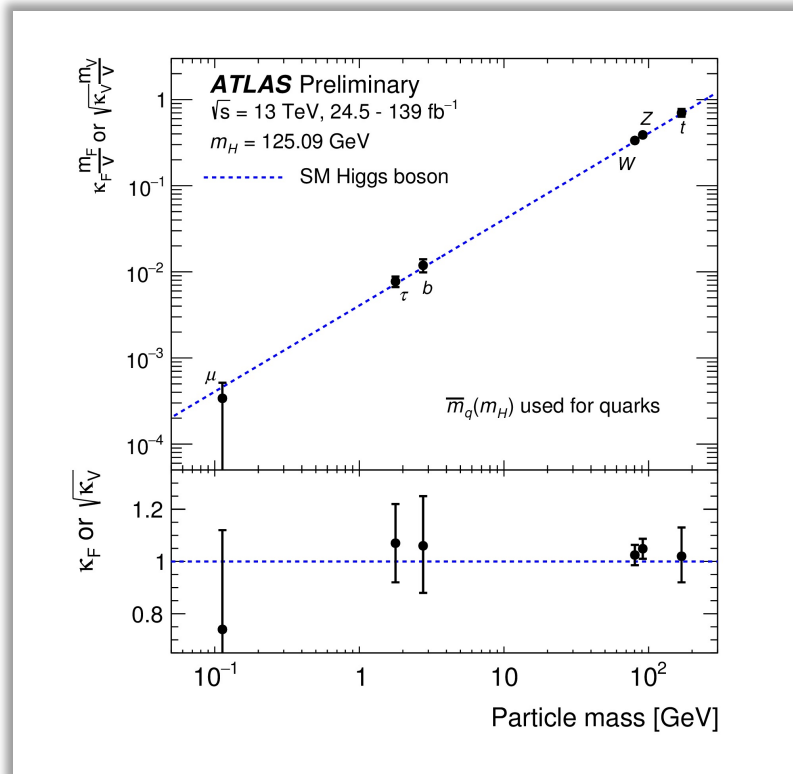
- La « grille de calcul pour le LHC » -> exportation des données brutes (notre patrimoine) dans des centres distants : impensable !
- Participation de la France à hauteur de ~10%



Et depuis ?



- Depuis 2012, accumulation de plus de statistique
- Etude des couplages entre le boson de Higgs et une particule donnée : montre leur relation entre leur couplage au champs de Higgs et leur masse
- But ultime : compréhension du potentiel de Higgs aujourd'hui -> indications sur les premiers instants de l'univers
 - Etude du couplage $h \rightarrow hh$
 - Extrêmement rare

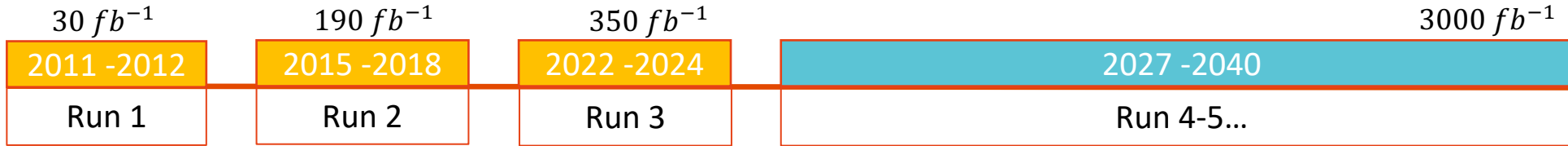


Séminaire SFP MP, Jan Stark (L2IT), déc. 2019

Une statistique décuplée



Lumi intégrée



40 millions de croisement de paquets de protons par seconde !

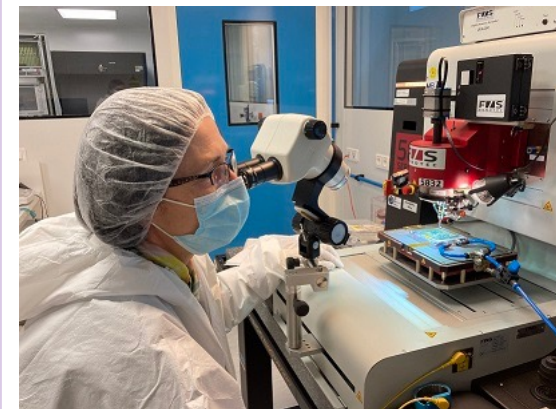
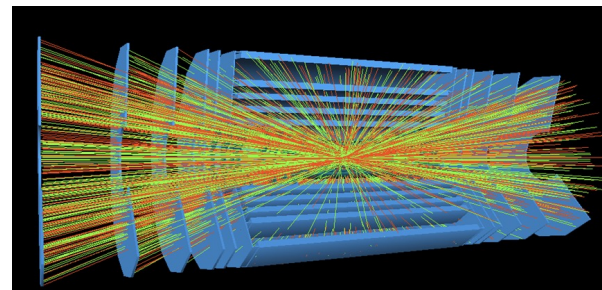
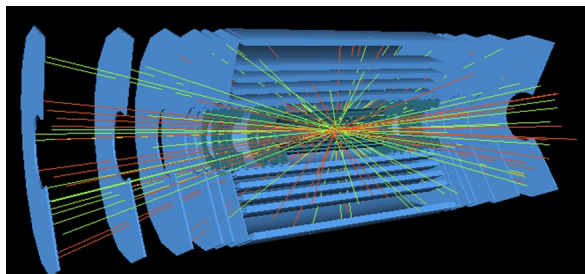
La phase de haute luminosité :

- Plus de données,
- Des faisceaux 5 fois plus intenses,
- Des collisions plus complexes ,
- Des détecteurs extrêmement sophistiqués.

Préparation du HL-LHC, aujourd'hui :

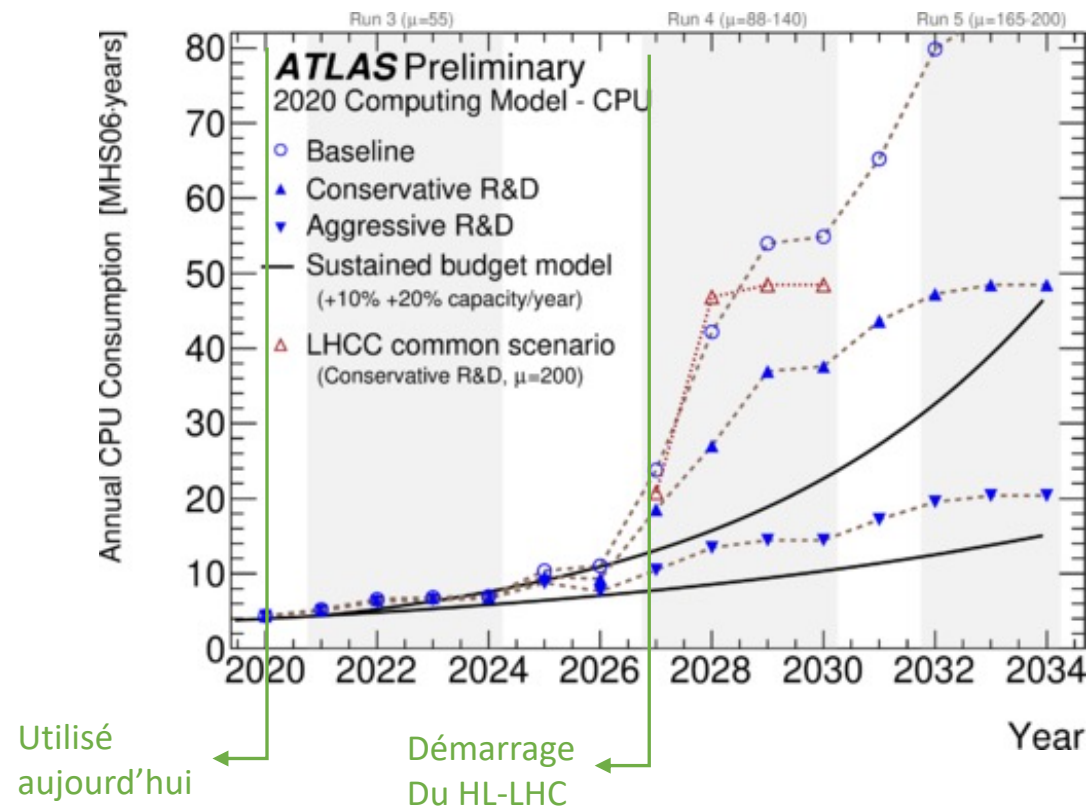
- Chaîne d'injection
- Construction des détecteurs
- Design des *computing* modèles

Haute luminosité : comment ? Croisement de paquets de protons, plus denses



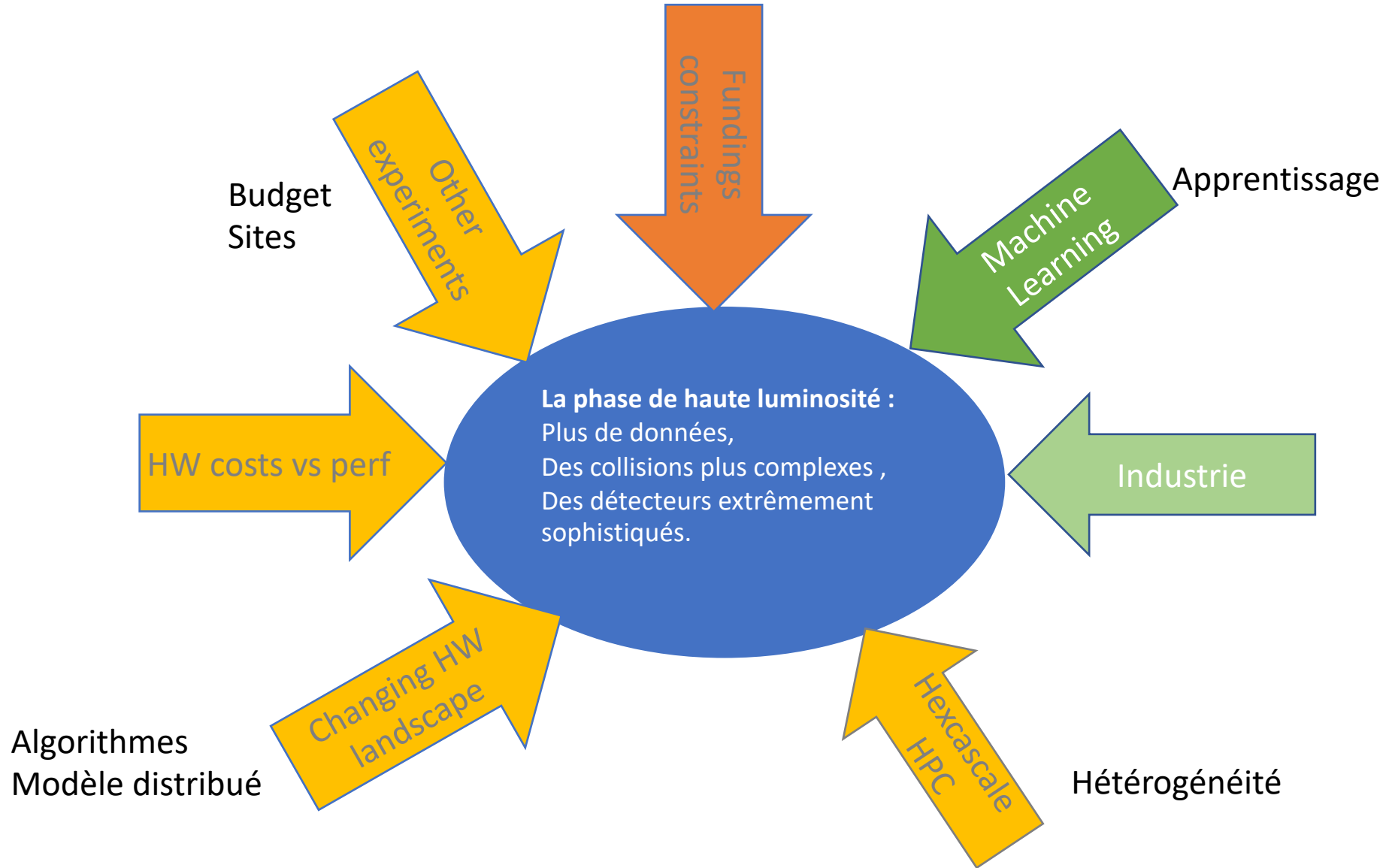
En terme de ressources de *computing*

- Ressources utilisées aujourd'hui :
- O(1) million de cœurs en continu
 - O(1) exaoctet de stockage



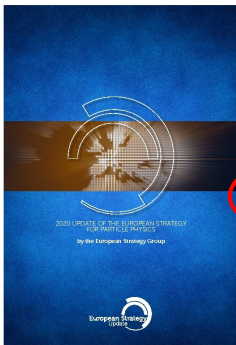
- Au HL-LHC : avec notre modèle de *computing* actuel, il manquera un facteur important dans les ressources de calcul et de stockage
- **nécessité de changements importants**
 - **au risque de limiter le programme de physique**

Contraintes et opportunités



10 ans pour nous préparer

- *Community white paper* (2017)
 - Algorithmes, infrastructures, data access...
- Des actions concrètes :
 - HEP Software Foundation (HSF)
 - Software Institute for Data-Intensive Sciences (SIDIS)
 - Création d'une revue scientifique « Computing and software for big Science » (Springer)
 - IRIS-HEP (Projet NSF U.S.A.)
 - Projet international Data Organization, Management and Access (DOMA)
- The 2020 update of the EU strategy for particle physics



D. Large-scale data-intensive software and computing infrastructures are an essential ingredient to particle physics research programmes. The community faces major challenges in this area, notably with a view to the HL-LHC. As a result, the software and computing models used in particle physics research must evolve to meet the future needs of the field. **The community must vigorously pursue common, coordinated R&D efforts in collaboration with other fields of science and industry, to develop software and computing infrastructures that exploit recent advances in information technology and data science. Further development of internal policies on open data and data preservation should be encouraged, and an adequate level of resources invested in their implementation.**

arXiv.org > physics > arXiv:1712.06982

Search... All fields Search

Help | Advanced Search

Physics > Computational Physics

A Roadmap for HEP Software and Computing R&D for the 2020s

Johannes Albrecht, Antonio Augusto Alves Jr, Guilherme Amadio, Giuseppe Andronico, Nguyen Anh-Ky, Laurent Aphenetche, John Apostolakis, Makoto Asai, Luca Atzori, Marian Babik, Giuseppe Bagliesi, Marilena Bandieramonte, Sunanda Banerjee, Martin Barisits, Lothar A.T. Bauerdick, Stefano Belforte, Douglas Benjamin, Catrin Bernius, Wahid Bhimji, Riccardo Maria Bianchi, Ian Bird, Catherine Biscarat, Jakob Blomer, Kenneth Bloom, Tommaso Boccali, Brian Bockelman, Tomasz Bold, Daniele Bonacorsi, Antonio Boveia, Concezio Bozzi, Marko Bracko, David Britton, Andy Buckley, Predrag Buncic, Paolo Calafiura, Simone Campana, Philippe Canal, Luca Canali, Gianpaolo Carlino, Nuno Castro, Marco Cattaneo, Gianluca Cerminara, Javier Cervantes Villanueva, Philip Chang, John Chapman, Gang Chen, Taylor Childers, Peter Clarke, Marco Clemencic, Eric Cogneras, Jeremy Coles, Ian Collier, David Colling, Gloria Corti, Gabriele Cosmo, Davide Costanzo, Ben Couturier, Kyle Cranmer, Jack Cranshaw, Leonardo Cristella, David Crooks, Sabine Crépe-Renaudin, Robert Currie, Sünje Dalmeier-Tiessen, Kaushik De, Michel De Cian, Albert De Roeck, Antonio Delgado Peris, Frédéric Derue, Alessandro Di Girolamo, Salvatore Di Guida, Gancho Dimitrov, Caterina Doglioni, Andrea Dotti, Dirk Duellmann, Laurent Duflot, Dave Dykstra, Katarzyna Dziejniewicz-Wojcik, Agnieszka Dziurda, Ulrik Egede, Peter Elmer, Johannes Elmsheuser, V. Daniel Elvira, Giulio Eulisse, Steven Farrell, Torben Ferber, Andrej Filipic, Ian Fisk, Conor Fitzpatrick, José Flix, Andrea Formica, Alessandra Forti, Giovanni Franzoni, James Frost, Stu Fuess, Frank Gaede, Gerardo Ganis, Robert Gardner, Vincent Garonne, Andreas Gellrich et al. (210 additional authors not shown)

(Submitted on 18 Dec 2017 (v1), last revised 19 Dec 2018 (this version, v5))

Particle physics has an ambitious and broad experimental programme for the coming decades. This programme requires large investments in detector hardware, either to build new facilities and experiments, or to upgrade existing ones. Similarly, it requires commensurate investment in the R&D of software to acquire, manage, process, and analyse the shear amounts of data to be recorded. In planning for the HL-LHC in particular, it is critical that all of the collaborating stakeholders agree on the software goals and priorities, and that the efforts complement each other. In this spirit, this white paper describes the R&D activities required to prepare for this software upgrade.

Download:

- PDF
- Other formats

Current browse context: physics.comp-ph < prev | next > new | recent | 1712

Change to browse by: hep-ex physics

References & Citations

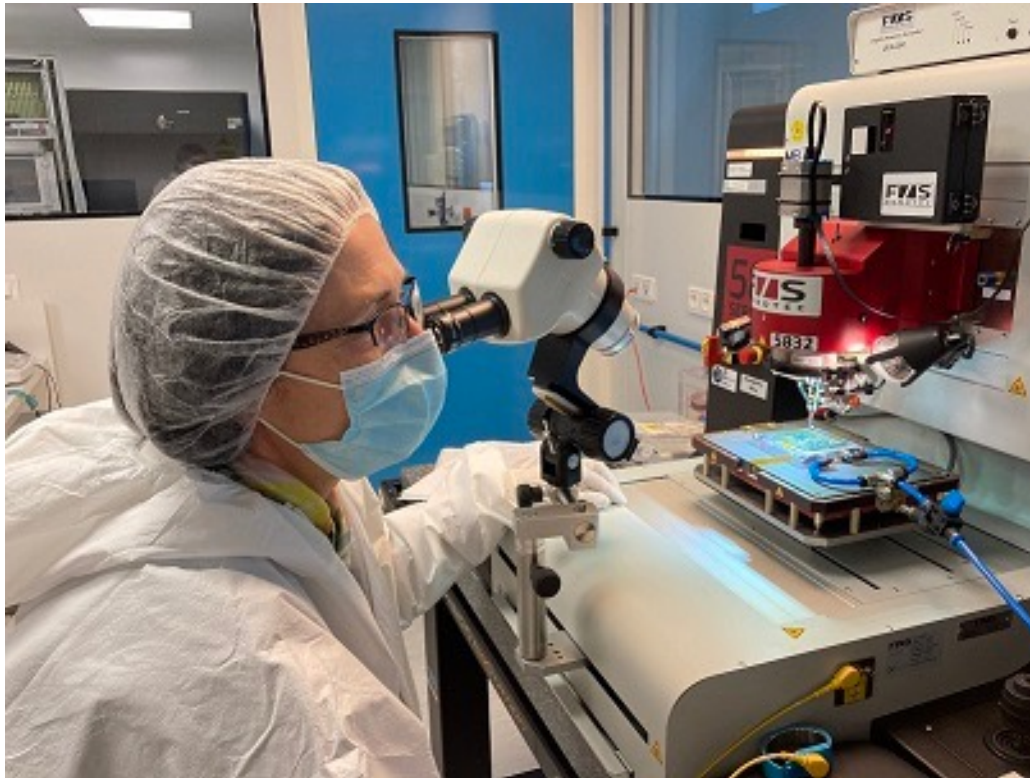
- INSPIRE HEP (refers to | cited by)
- NASA ADS

Export citation Google Scholar

Bookmark

Plusieurs façons de participer

La France est très impliquée dans la partie de ATLAS pour détecter les particules ionisantes : le trajectographe ITk



Nos collègues du LPNHE, Paris

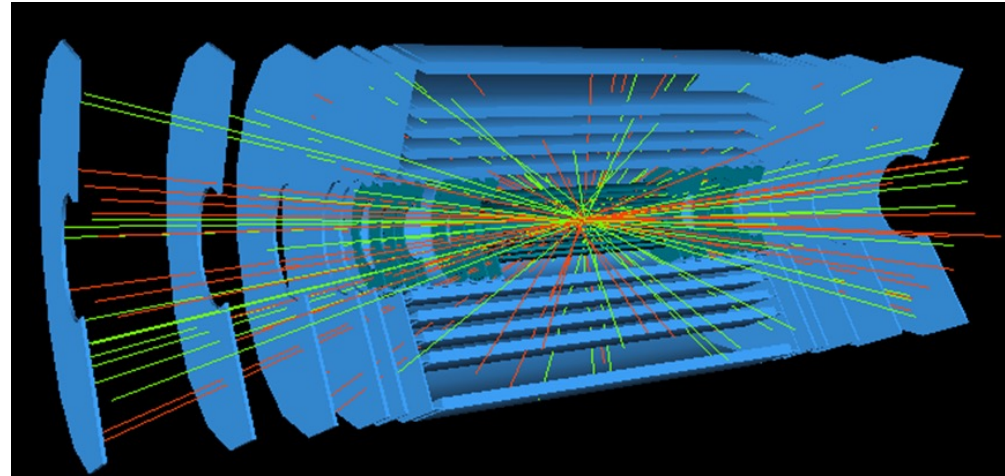


Nos activités clés au L2IT sont celles du numériques.

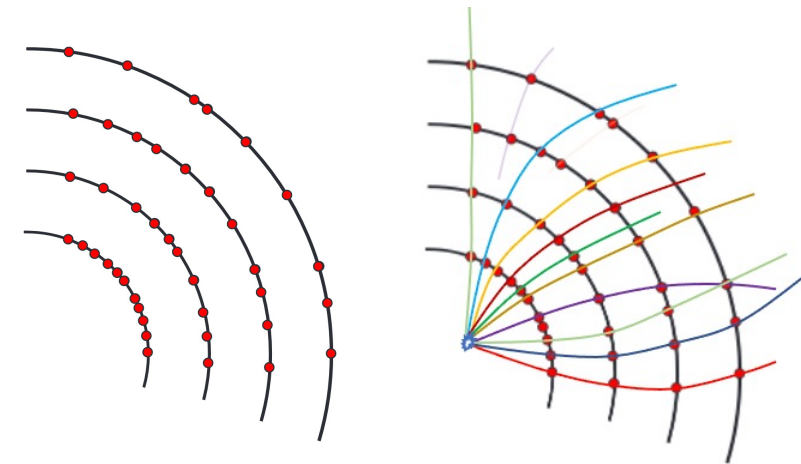
La reconstruction de traces dans ATLAS



- Collision de faisceau de proton-proton à haute énergie dans LHC

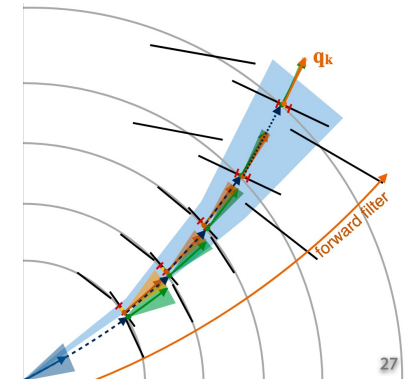


- Les particules laissent des « Hits » dans les modules du détecteur
- Trouver les trajectoires (traces) des particules chargées produites dans les collisions p-p
- Nécessaire pour étudier les propriétés des particules produites (objets physiques)



Le défi de HL-LHC pour la reconstruction de traces

- Reconstruction actuellement résolue par des algorithmes basés sur des filtres de Kalman
- Estimation des paramètres de la trajectoire hélicoïdal
- Très bonne performance et optimisé depuis des années
- La partie la plus coûteuse **en complexité de calcul (donc en ressources CPU)** dans la reconstruction d'un événement
- La combinatoire va exploser avec HL-LHC (pileup $\sim 20 \Rightarrow$ pileup ~ 200)
- Va entraîner une augmentation très importante du volume et de la complexité des données
- **Les algorithmes actuels ne suffiront pas**



1. propagate p_{k-1} and its covariance C_{k-1} :

$$q_{k|k-1} = f_{k|k-1}(q_{k-1|k-1})$$

$$C_{k|k-1} = F_{k|k-1} C_{k-1|k-1} F_{k|k-1}^T + Q_k$$

with $Q_k \sim$ noise term (M.S.)

2. update prediction to get $q_{k|k}$ and $C_{k|k}$:

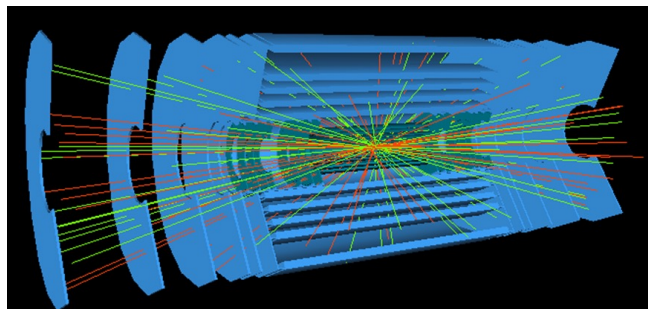
$$q_{k|k} = q_{k|k-1} + K_k [m_k - h_k(q_{k|k-1})]$$

$$C_{k|k} = (I - K_k H_k) C_{k|k-1}$$

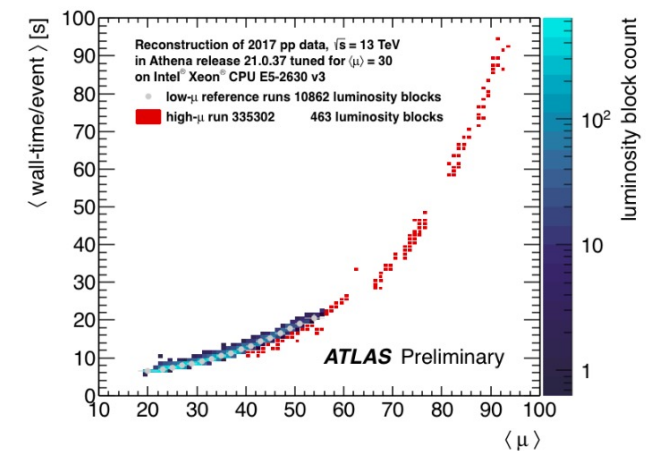
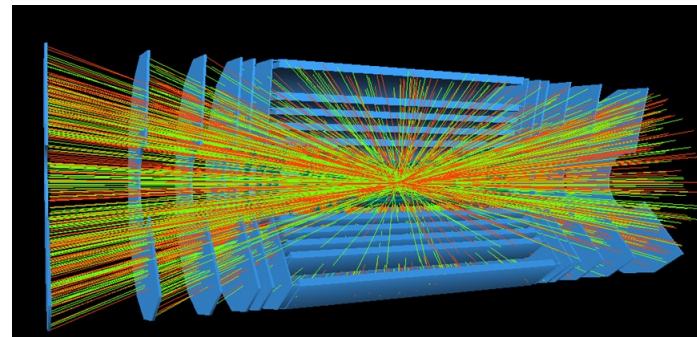
with $K_k \sim$ gain matrix:

$$K_k = C_{k|k-1} H_k^T (G_k + H_k C_{k|k-1} H_k^T)^{-1}$$

LHC (pileup ~ 20)



HL-LHC (pileup ~ 200)

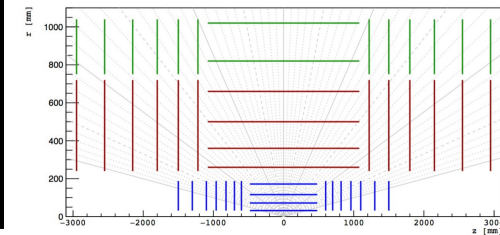
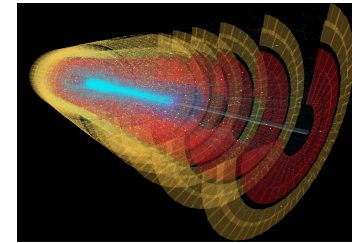


Trouver de nouveaux algorithmes pour répondre au défi de HL-LHC

- Est-ce que l'on peut utiliser le Machine Learning pour aider à reconstruire les traces ?

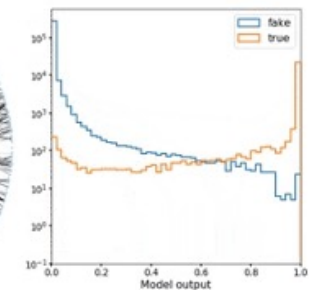
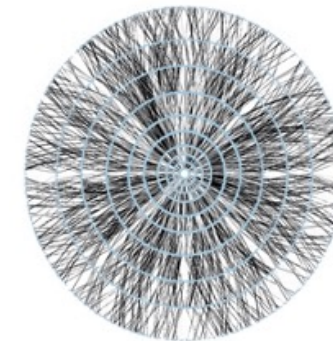
- TrackML Particle Tracking Challenge

- Simulation avec ACTS pour fournir des données réalistes dans les conditions de HL-LHC (pileup de 200, ~10k tracks/event, ~100k hits/event)
- Détecteur générique (géométrie simplifiée)
- Gros volume de données (100k events, 10 billion tracks)
- Objectif du challenge : Trouver une solution ML pour assembler les hits pour chaque trace
- Les physiciens ont été déçu du résultat => besoins de véritables collaboration physicien – data scientist

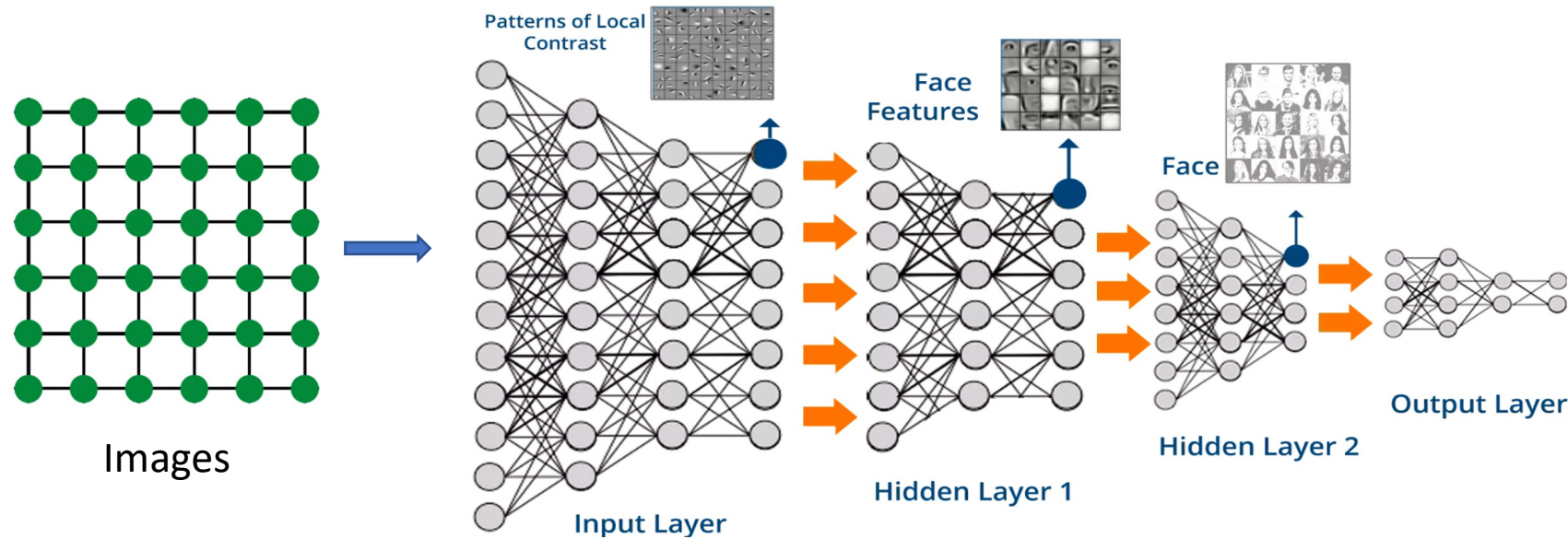


- Exa.Tkrx project (« **Graph Neural Networks for Particle Reconstruction in High Energy Physics detectors** » [arXiv:2003.11603](https://arxiv.org/abs/2003.11603))

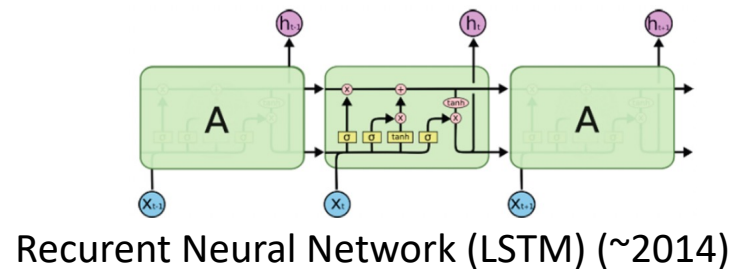
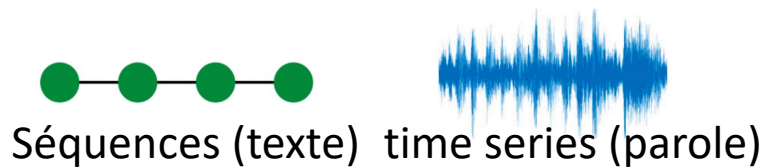
- Représentation des données sous forme de graphe
- Entraîner des réseaux de neurones avec une architecture adaptée les « Graph Neural Networks » (GNNs)
- Preuve de principe sur le dataset de TrackML



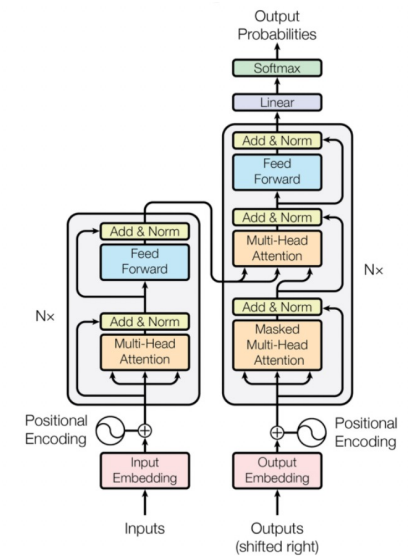
Les GNNs des réseaux de neurones récents



Convolutional Network CNN (~2012)

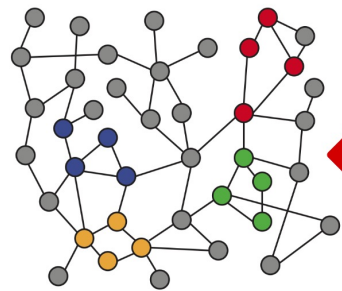
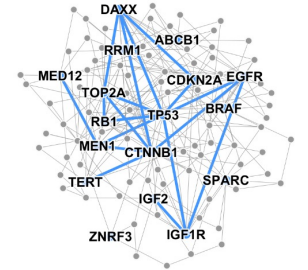
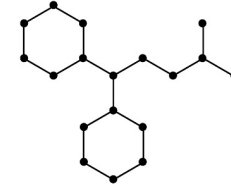
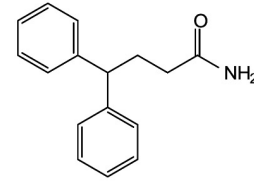
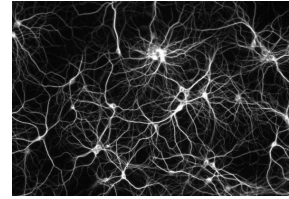


Recurrent Neural Network (LSTM) (~2014)

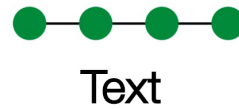
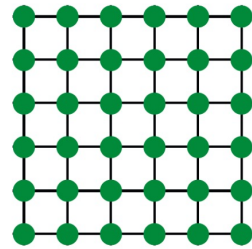


Architectures Transformer « Attention Is All You Need » (2017)

Les GNNs des réseaux de neurones récents



VS.



Networks

Images

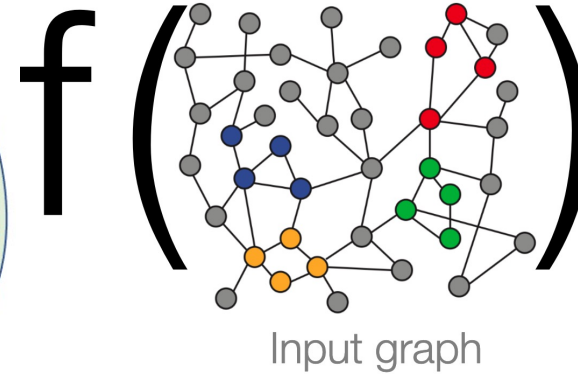
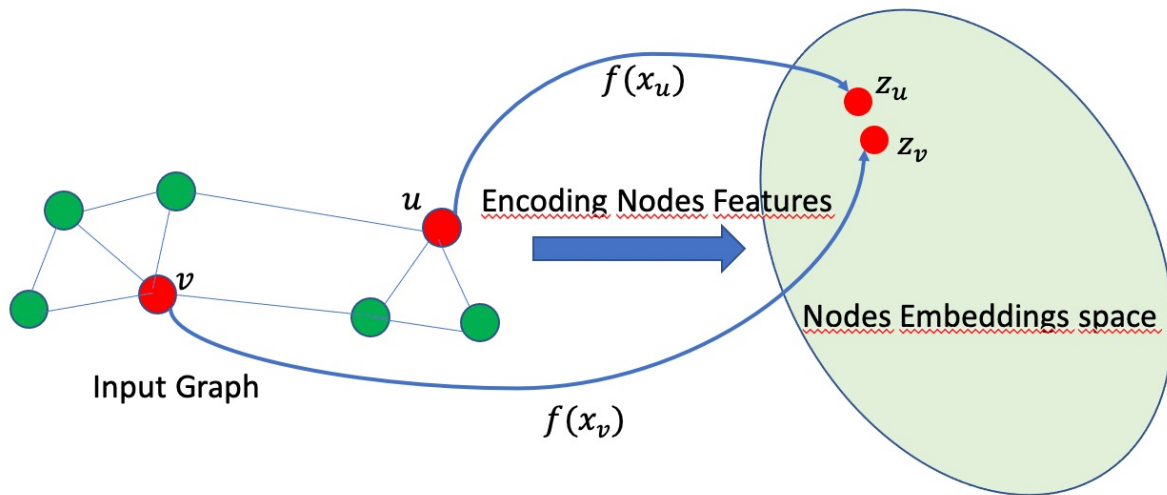
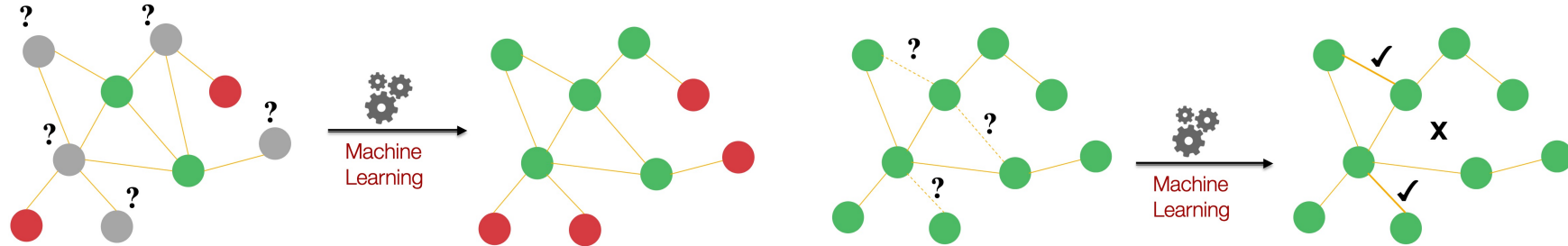
- Graphe pour représenter des données éparses avec des relations
- Apprentissage sur les graphes est difficile car:
 - Taille arbitraire et structure topologique complexe
 - Pas de notion d'ordre ou de point référent



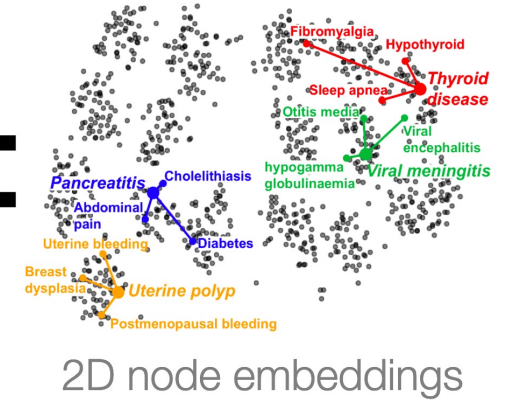
Graph Neural Networks (~2018)

Que peut-on faire avec un GNN ?

- Classification de nœuds
- Classification des arcs
- Prédiction de liens
- Classification de graphes



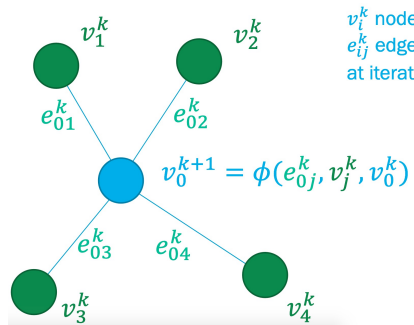
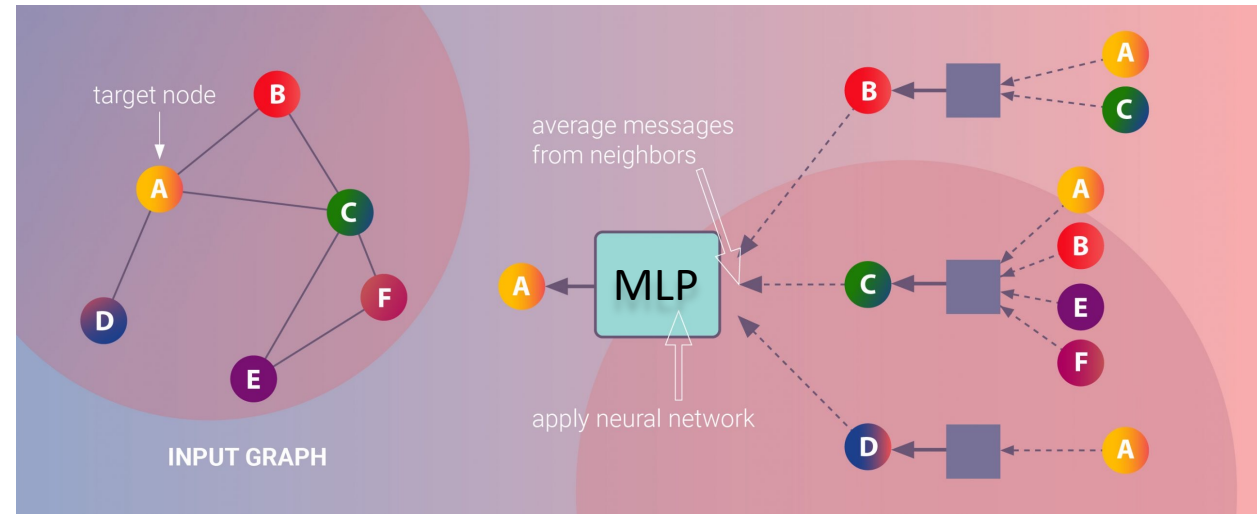
=



Architecture des GNNs

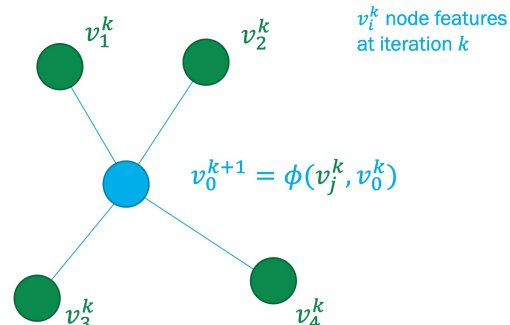
A chaque itération, pour chaque nœud et/ou pour chaque arc du graphe:

- 1) Agréger les informations du voisinage.
- 2) Appliquer un réseaux de neurones multicouches non linéaires.



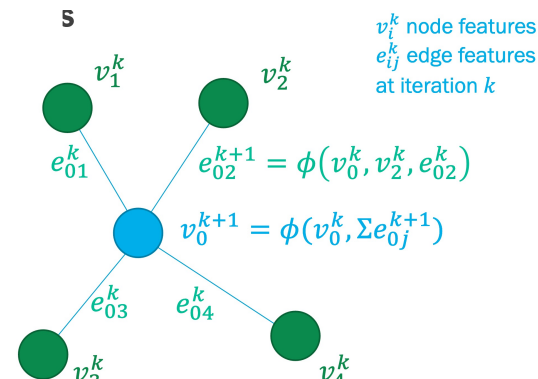
v_i^k node features
 e_{ij}^k edge features
at iteration k

Message passing



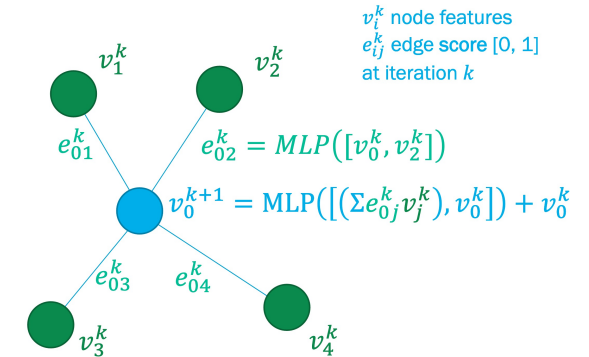
v_i^k node features
at iteration k

Graph Convolutional Network



v_i^k node features
 e_{ij}^k edge features
at iteration k

Interaction Network

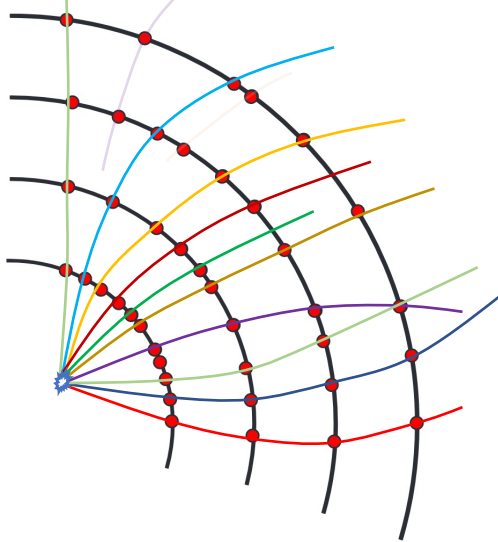


v_i^k node features
 e_{ij}^k edge score $[0, 1]$
at iteration k

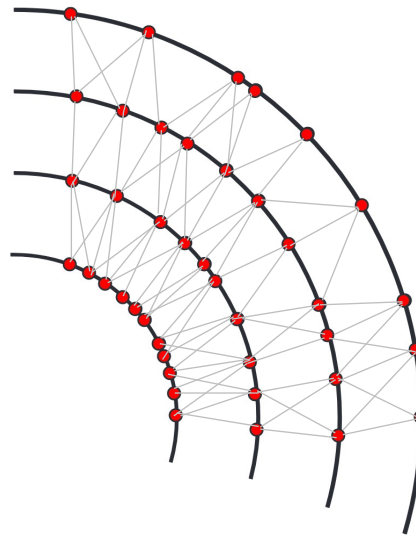
Graph Attention Network

Représentation des données du détecteur sous formes de graphe

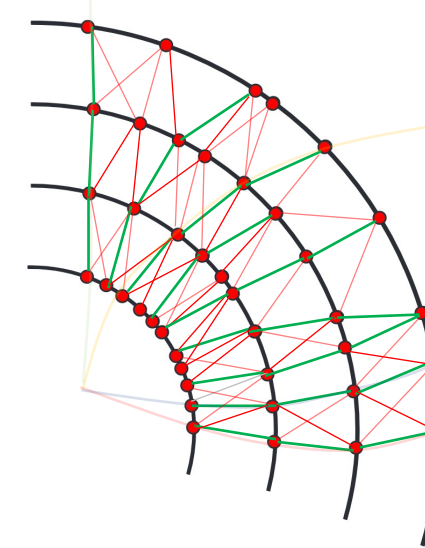
Les particules laissent des hits dans le détecteur



Construction des graphes à partir des données du tracker



Ce qu'on voudrait faire:
Classifier les arcs du graphe



Score haut = forte probabilité que l'arc appartienne à une trace

Score faible = faible probabilité que l'arc appartienne à une trace

Un nœud du graphe = Un hit du tracker

On ajoute un arc entre deux en deux nœuds si:

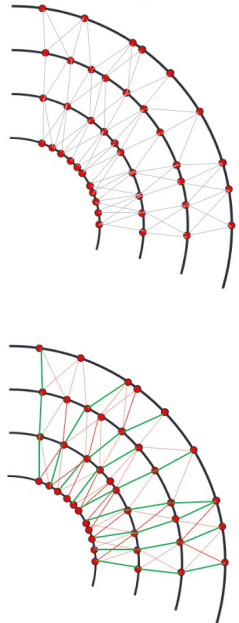
- **Connexion possible entre modules** (Module Map)
- **Coupure sur critères de physique** (courbe de la trace, ...)

Apprentissage des patterns de traces avec des GNNs

Input graph

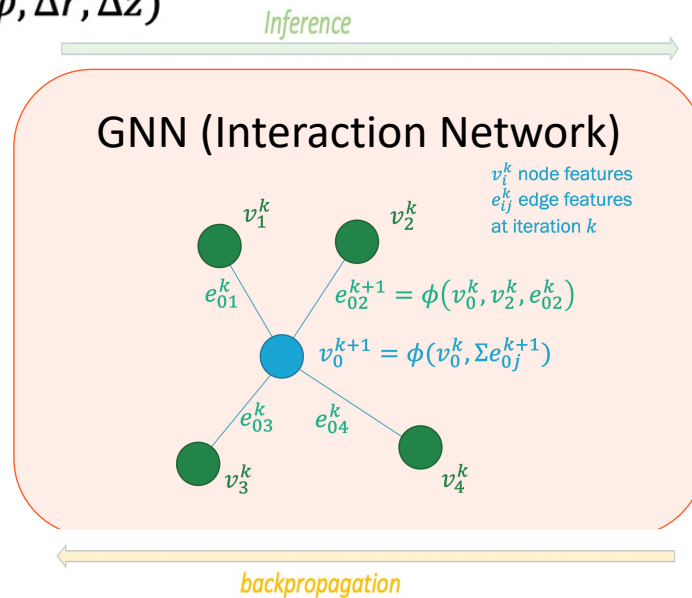
Nodes features: (r, φ, z)

Edges features: $(\Delta\eta, \Delta\varphi, \Delta r, \Delta z)$

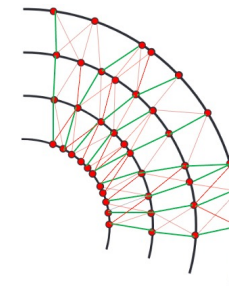


Target graph

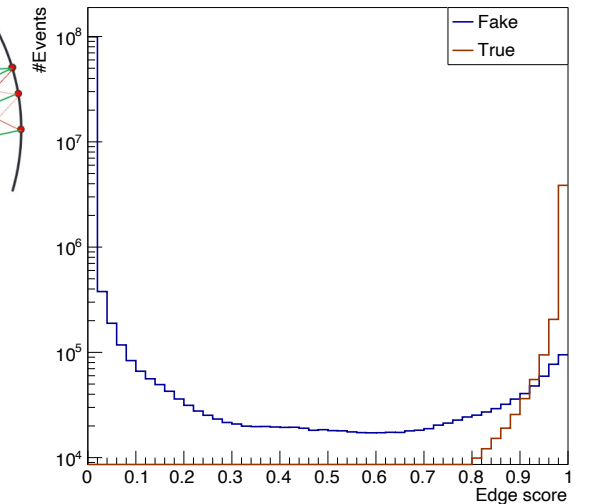
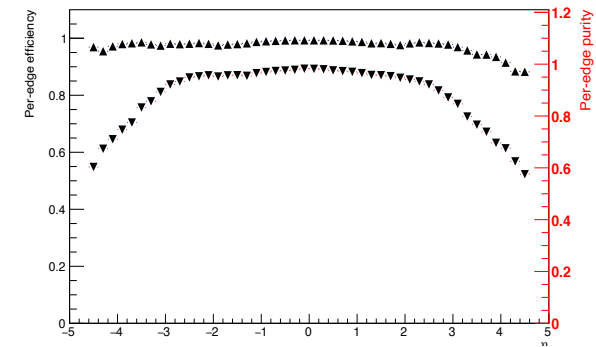
Target: $\begin{cases} \text{label} = 1 \text{ if } \textit{true} \text{ edge} \\ \text{label} = 0 \text{ if } \textit{fake} \text{ edge} \end{cases}$



Predict graph



Edges scores



Nos travaux actuels au L2IT

- **Simulation et construction de données plus réaliste**

- Détecteur ITk

(Futur détecteur de ATLAS, géométrie + complexe)

- Simulation **très précise** des conditions HL-LHC

(pileup 200 + diffusion multiple + ionisation)

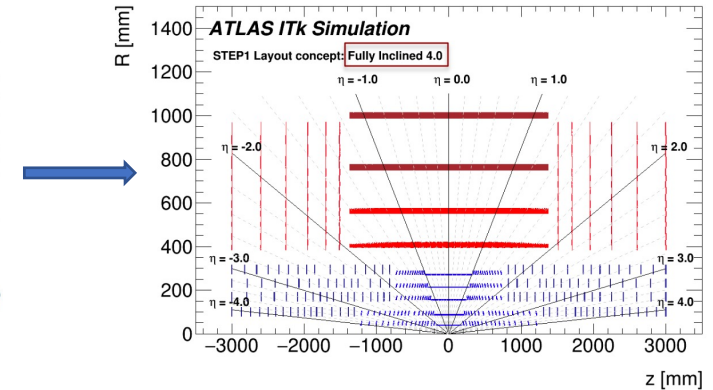
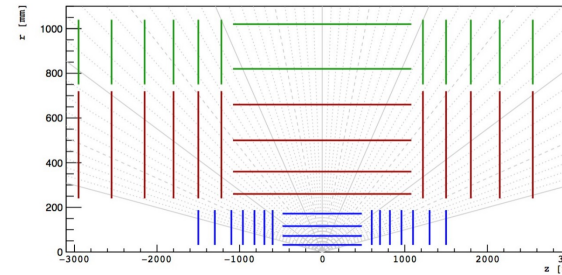
- => **Topologie des graphes beaucoup plus complexe**

- **Test de différentes architectures GNN** (Interaction Network, Graph Attention Network, ...)

- **Comparaison de performances** avec le Filtre de Kalman d'Athena (Software de tracking de ATLAS)

- **Intégration ACTS** (A Common Tracking Software)

- Solution(s) ML pour le tracking
- Architectures cibles (CPU et GPU)



Conclusion

- Le HL-LHC arrive !
- Un programme de physique extrêmement ambitieux : les propriétés du boson de Higgs et des potentialités de nouvelle physique
- Pose un véritable challenge en terme de *computing*
- Chantier important pour repenser l'ensemble de notre modèle de *computing*
- De nouveaux algorithmes de ML émergent pour traiter les données dans les conditions HL-LHC
- Au L2IT, nous développons des algorithmes basés sur les GNNs pour la reconstruction de traces
- Nous avons démarré et nous sommes maintenant prêts à étendre nos collaborations à la frontière entre la physique expérimentale et Machine Learning