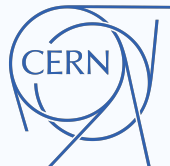


Allen : traitement de données temps réel à haut débit avec des GPUs dans LHCb et les défis de demain

Gaëlle Khreich

AG du Pôle Ingénierie

IJCLab, 15 April 2026





Analyse des désintégrations rares

Outil automatique d'analyse en temps réel

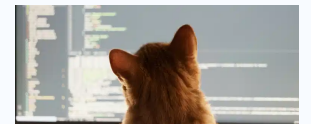


2021-2024 —
Doctorat en Physique des particules



Reconstruction calorimétrique
pour l'Upgrade II pour LHCb

2025-Present — Postdoc 2



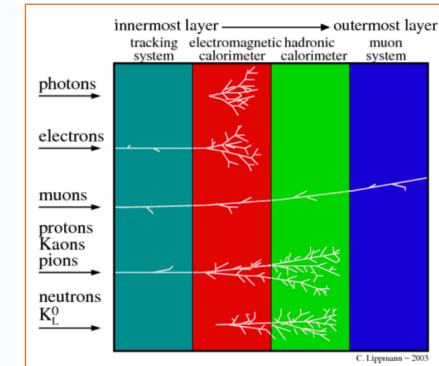
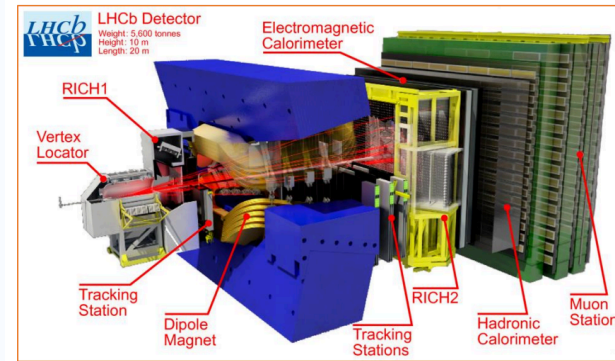
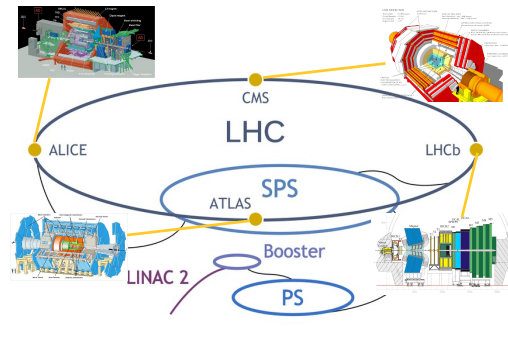
2024-2025 — Postdoc 1

Analyse des données
collectées en 2024

2019 — arrivée en France
Master : Physique fondamentale

LHCb

- L'une des quatre grandes expériences du LHC au CERN
- **En fonctionnement depuis 2010**
- Consacrée à l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares des hadrons beaux et charmés ainsi que de la physique des ions lourds et des collisions sur cible fixe

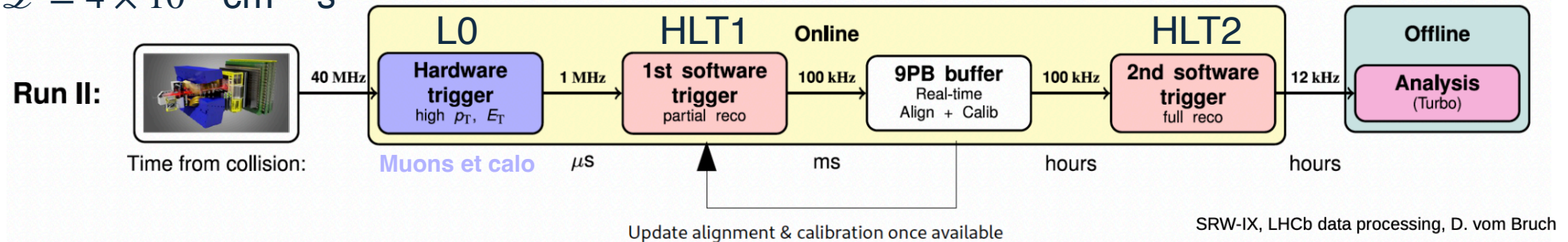


Implication du laboratoire dans l'électronique, l'instrumentation, la reconstruction

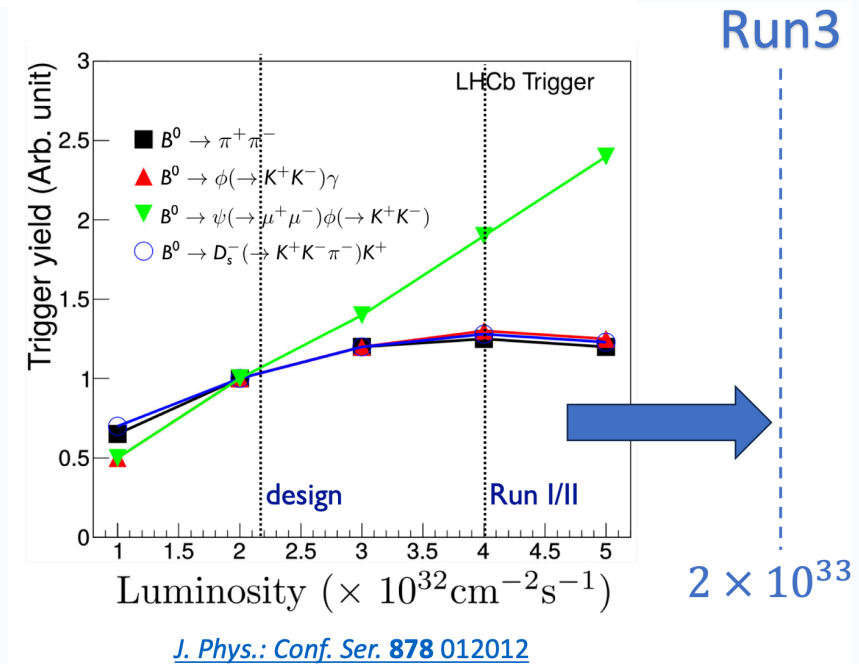
	Date	Runs	Instantaneous luminosity \mathcal{L} [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]
LHCb	2010-2018	Run 1 & Run 2	4×10^{32}
LHCb Upgrade I	2022-2033	Run 3 & Run 4	2×10^{33}
LHCb Upgrade II	2036-2041	Run 5	10×10^{33}

L'ancien système de trigger de LHCb

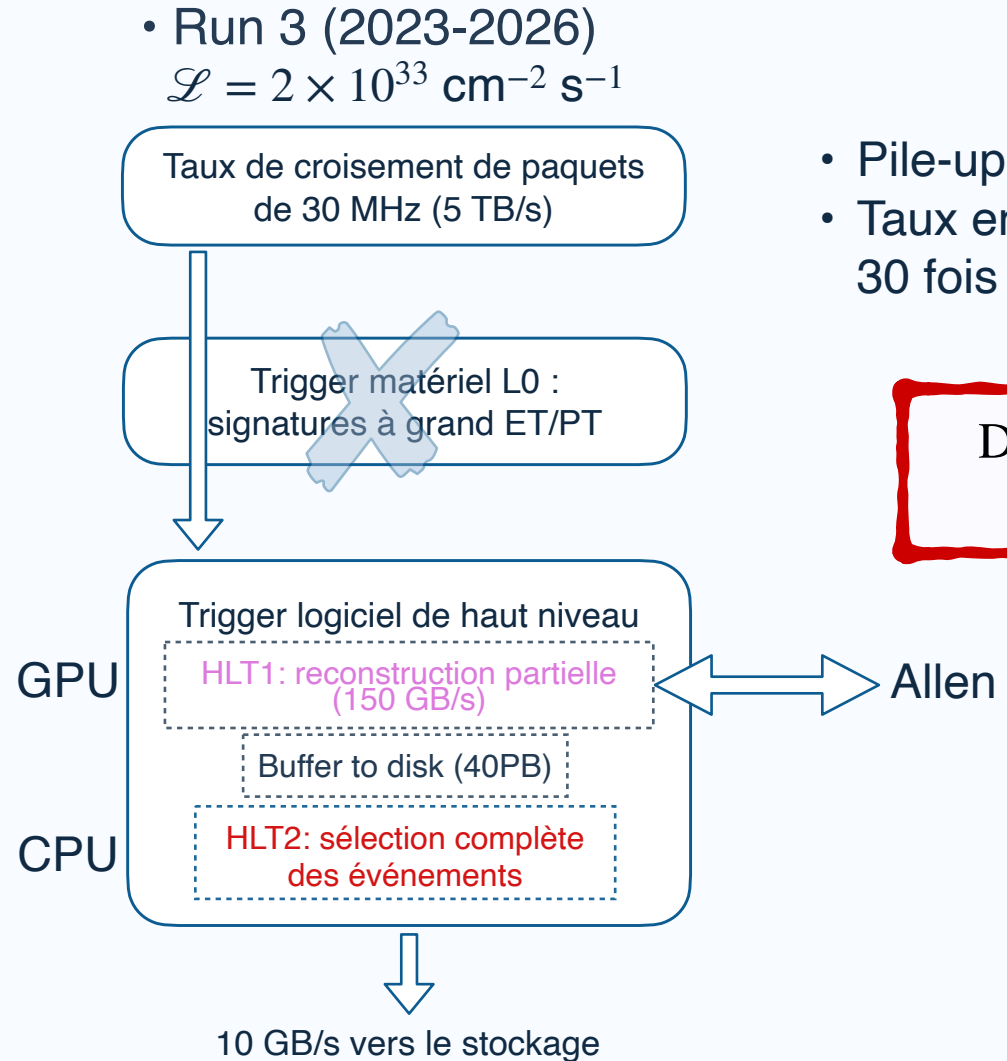
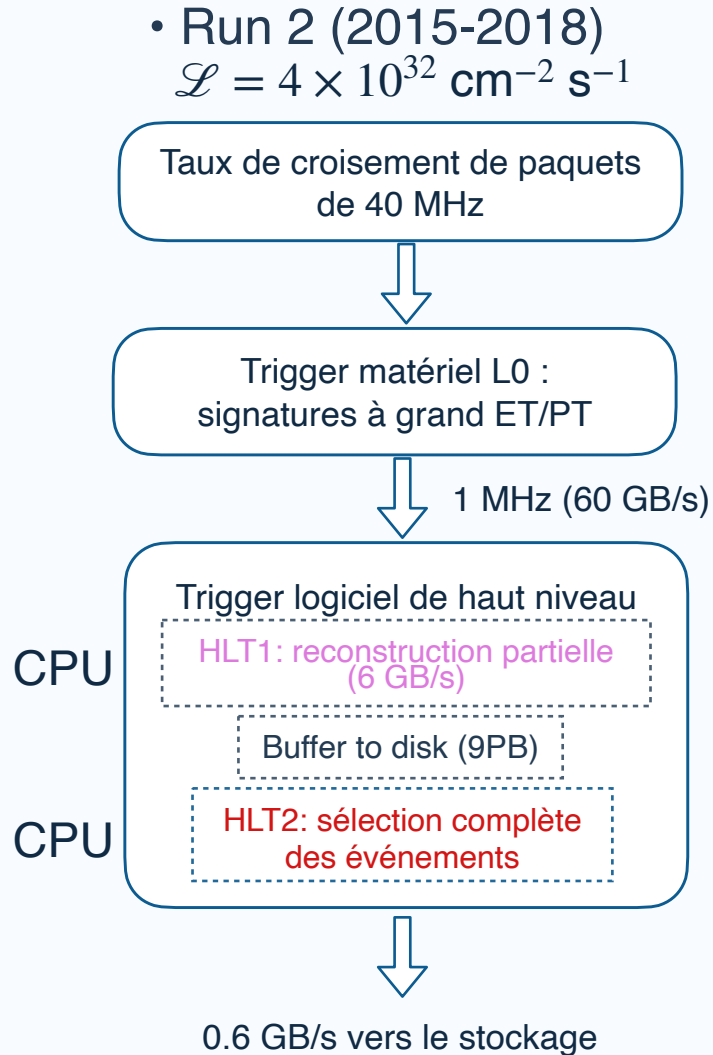
- Run 2 (2015-2018)
 $\mathcal{L} = 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



- La première réduction du flux d'événements était assurée par le trigger matériel (L0).
- Le trigger matériel est peu efficace pour des pile-up > 1 et pour la physique saveur à faible p_T à LHCb.
- L'efficacité du trigger matériel atteint un plateau pour les états hadroniques finaux.



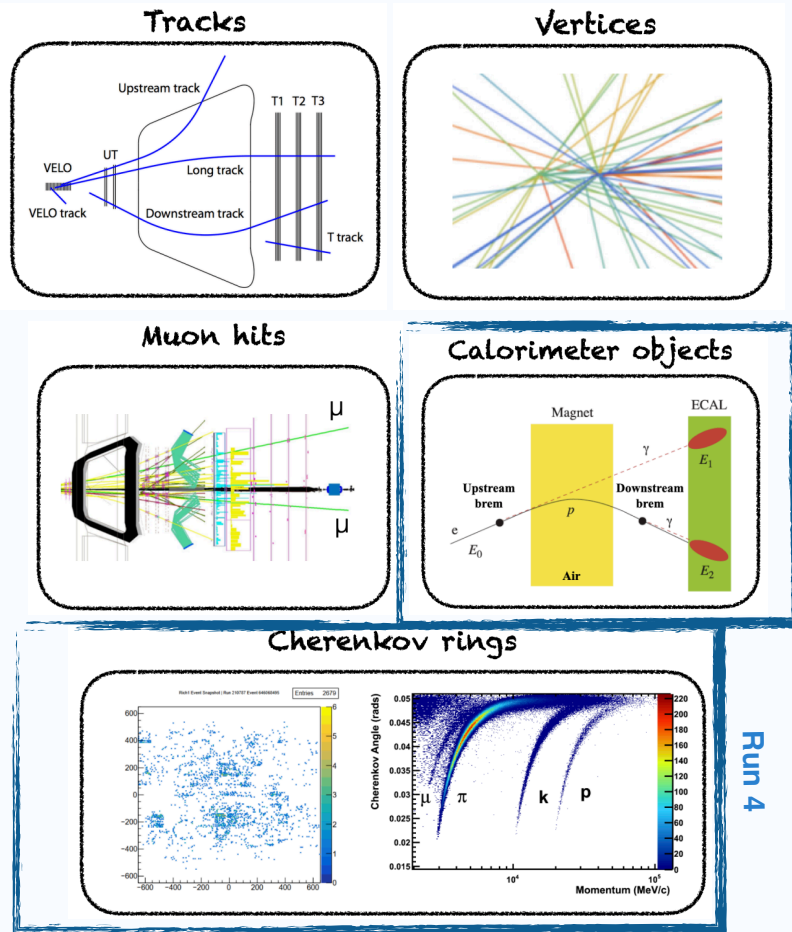
Le système de trigger actuel de LHCb



- Pile-up 5 fois plus élevé
- Taux entrant dans HLT1 30 fois plus élevé

Défi informatique majeur

Que reconstruit-on dans HLT1 ?



New Run 3

Run 4

Pourquoi sur GPU ?

HLT1 property	GPU strength
De nombreuses tâches parallèles au sein des événements et entre événements	Parallélisme massif, fin et par lots
Les événements bruts sont relativement compacts	Batching efficace dans la mémoire du GPU
Contraint par le débit global en événements/s, et non par la latence d'un événement individuel	Optimisés pour les charges de travail à haut débit

30 million independent collisions events per second, 100 kB each

Allen : framework logiciel et choix de conception pour HLT1 sur GPU

<https://gitlab.cern.ch/lhcb/Allen>
[arXiv:1912.09161](https://arxiv.org/abs/1912.09161)



Nommé d'après
Frances E. Allen

Fonctionnalités du framework

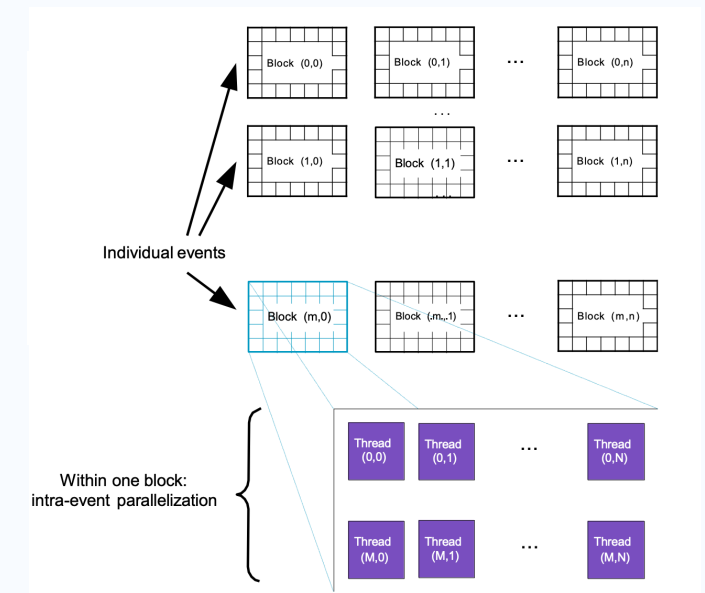
- Base de code unique pour l'exécution sur CPU et GPU par macros
- Configuration en Python de la séquence de reconstruction
- Gestionnaire mémoire et ordonnanceur multi-événements
- Monitoring intégré et compatibilité avec l'environnement logiciel de LHCb

Principes de conception

- Garder presque tout le travail sur le GPU
- Minimiser les copies entre l'hôte et le GPU
- Optimiser le débit, et non la latence par événement

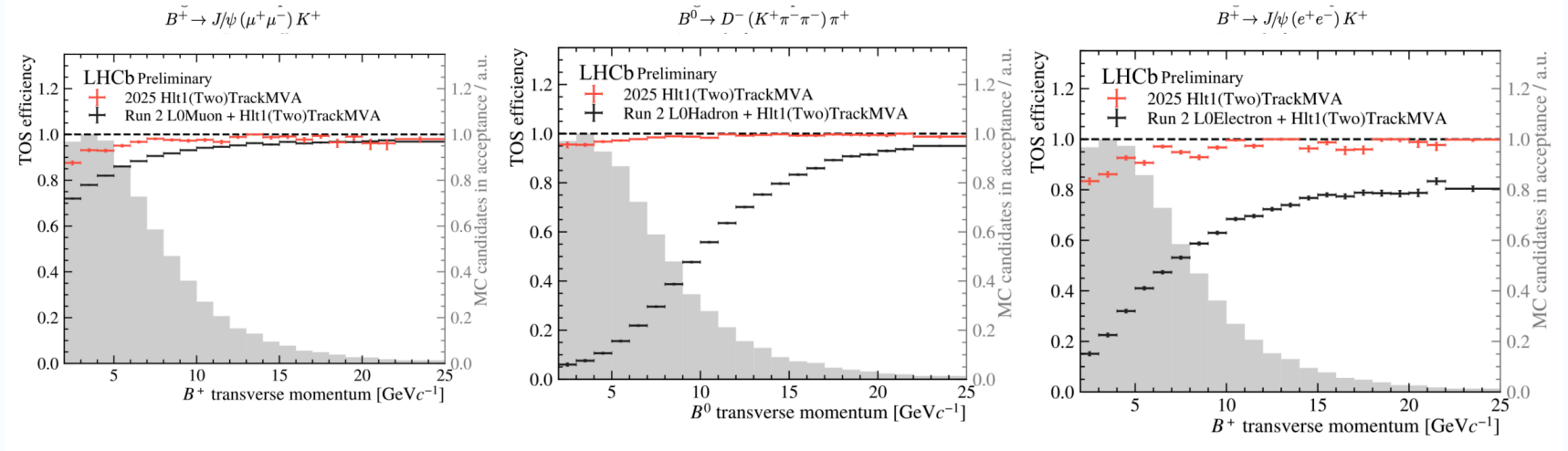
Trois niveaux de parallélisme

- **Inter-événements** : de nombreux événements indépendants sont distribués sur les blocs GPU
- **Intra-événement** : de nombreux hits, traces et objets sont traités en parallèle par des threads GPU au sein d'un bloc
- **Plusieurs lots d'événements** peuvent aussi être traités simultanément sur différents streams GPU



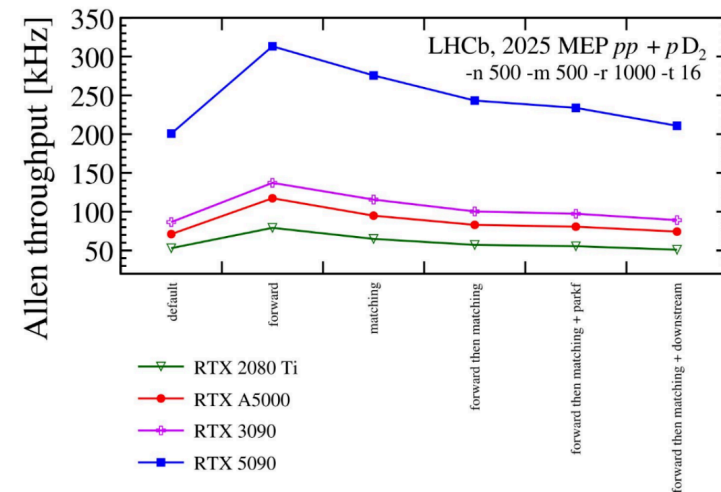
Critères de performance

- Efficacité physique



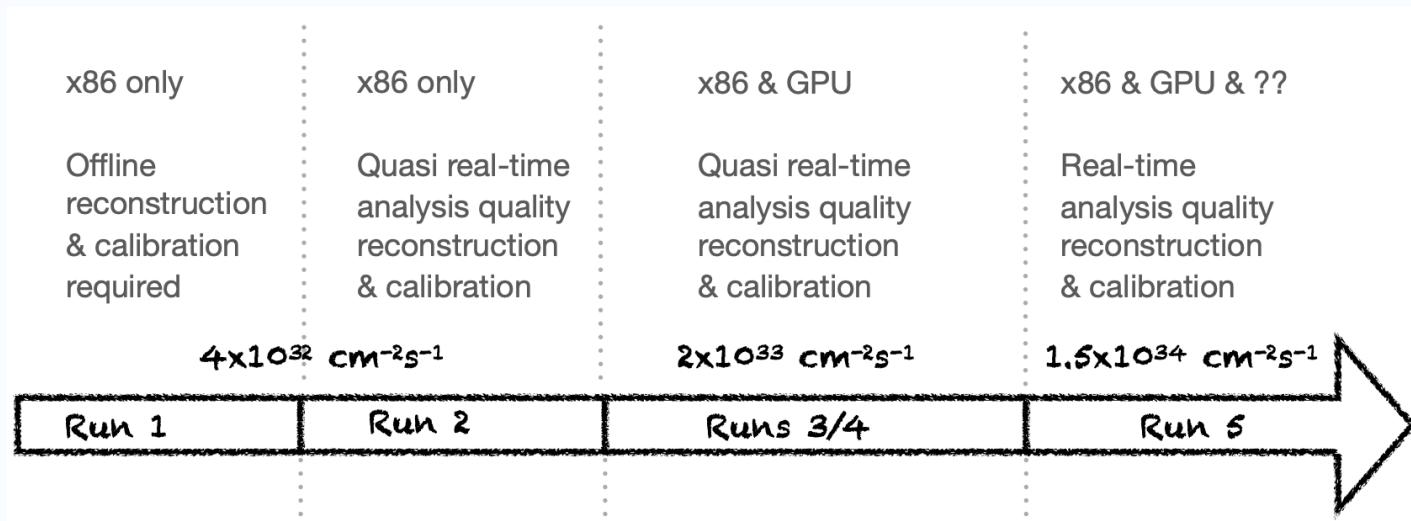
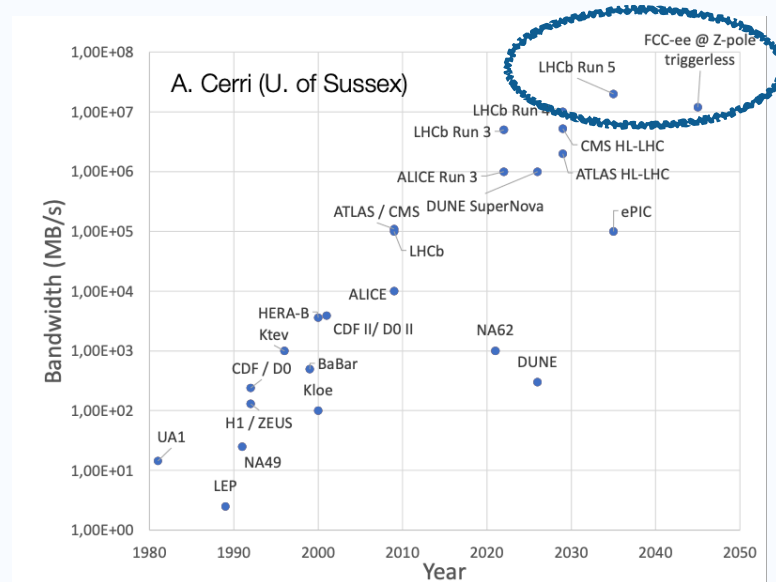
- Débit

O(500) GPUs RTX A5000 permettant un HLT1 à 30 MHz



Le défi du trigger de LHCb pour l'Upgrade II (Run 5 du LHC)

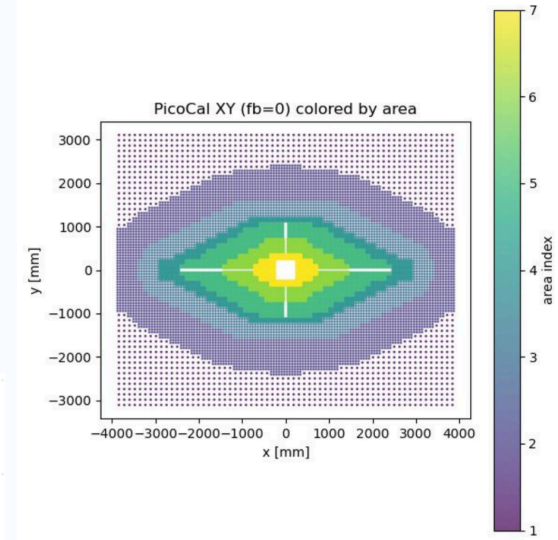
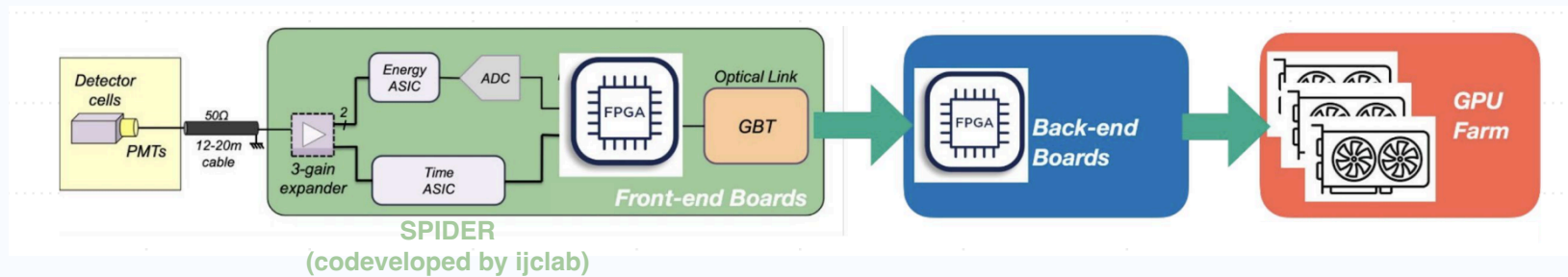
- R&D à mener au cours des prochaines années
- Prévoir d'adapter les frameworks logiciels comme Allen pour faire face à ces défis et vers le futur
- Les techniques de ML / IA deviendront de plus en plus importantes pour la reconstruction, la classification et la sélection
- Défi spécifique à la physique des hautes énergies : inférence rapide à 30 MHz sur GPUs, FPGAs et technologies émergentes



PicoCal comme cas d'usage pour Allen

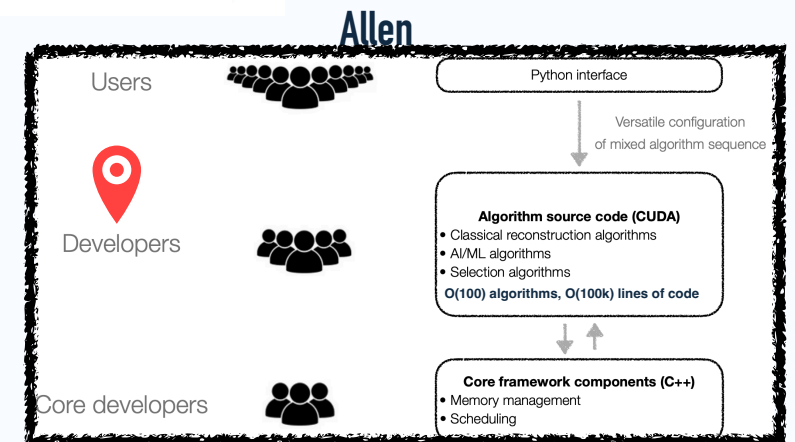
Mon travail

- PicoCal est un détecteur relativement autonome (4D) , ce qui en fait un bon terrain d'étude pour explorer la reconstruction dans Allen
- Les conditions de l'Upgrade II renforcent le défi : bande passante / débit, contraintes de radiation et occupation pour le calorimètre



Roadmap:

- Adapter l'algorithme de reconstruction HLT1 du Run 3 au Run 5
- Explorer des modèles d'IA dans des conditions de haut débit
- Ajouter l'information temporelle pour séparer les effets de pile-up
- Accélération sur FPGA (pas encore explorée)

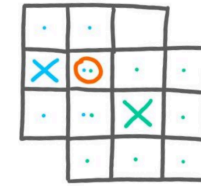


PicoCal comme cas d'usage pour Allen

Mon travail

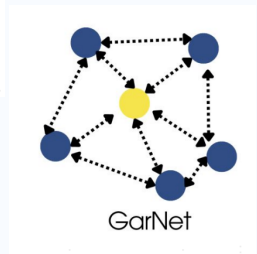
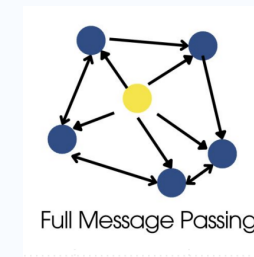
1. La baseline classique

- Graine = maximum local
- Clustering 3×3 autour des graines
- Corrections de l'énergie partagée



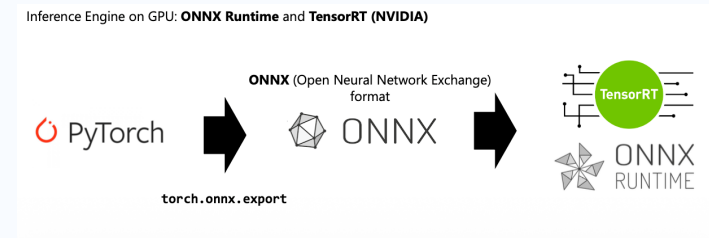
2. Modèles de graphe en ML

- **Graphe d'entrée** : nœuds = cellules avec (E, x, y) , arêtes = distances, variables globales = propriétés de la graine
- **GNN standard** : message passing complet sur le graphe
- **GarNet**: modèle de graphe léger remplaçant le message passing explicite sur les arêtes par des agrégateurs appris via des sommets latents, ce qui réduit le nombre d'opérations mathématiques et le coût d'inférence



3. Déploiement

- **Objectif** : comparer la reconstruction classique et la reconstruction ML sous les contraintes de débit en temps réel de HLT1
- **Chaîne de portage** : PyTorch → ONNX → ONNX Runtime / TensorRT sur GPU



ODISSEE

Online Data Intensive Solutions for Science in the Exabytes Era



- Réunit 18 partenaires (HL-LHC, SKAO et SLICES-RI ...) pour répondre à des défis communs en big data et en calcul
- Développe de nouvelles solutions matérielles et logicielles pour le traitement et l'analyse de volumes massifs de données
- Vise à améliorer les performances, la durabilité et la souveraineté numérique de l'Europe
- Construit un impact à long terme grâce à la formation, au transfert de technologie et à la diffusion entre le monde académique et l'industrie

Take-home message

- La suppression du trigger matériel a déplacé le défi vers HLT1
- Allen répond à ce défi grâce à une architecture GPU
- Pour Upgrade II, il faudra aller plus loin en reconstruction, timing, ML et peut-être FPGA
- PicoCal est un bon point d'entrée pour étudier ces futures solutions

Merci!

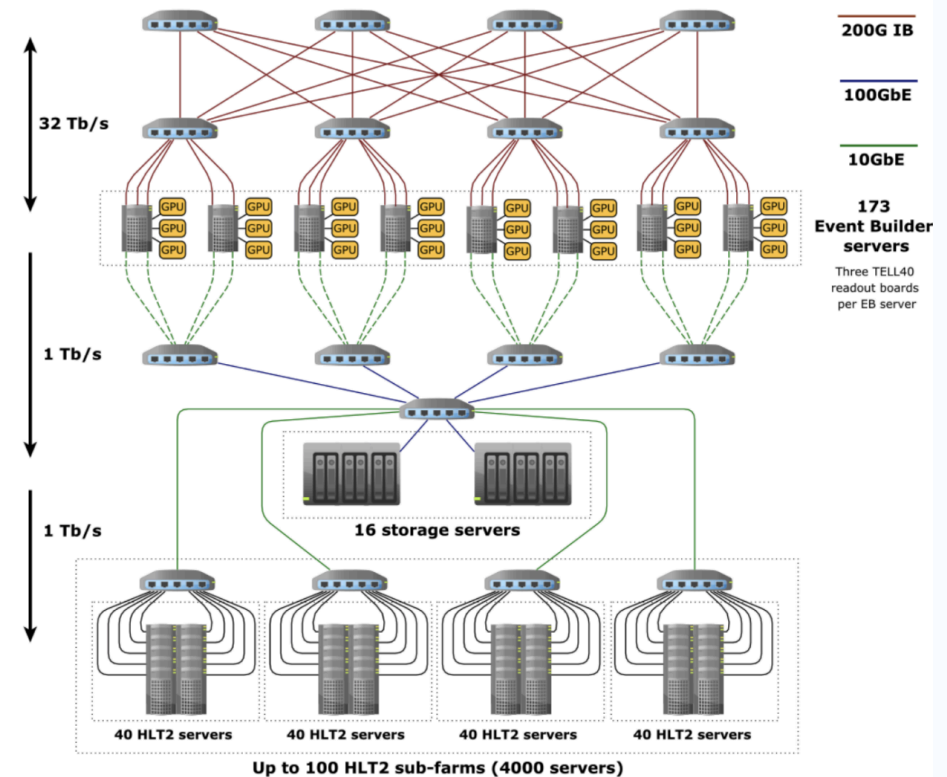
Heterogeneous computing system

- Raw detector data is received by FPGA cards
- 163 event builder servers aggregate data from subdetectors
- Each server hosts 3 GPU cards on which HLT1 is run
 - Around 500 Nvidia A5000 in total
 - Output of HLT1 is stored on storage servers while alignment & calibration is processed
- HLT2 is processed on computing farm with 250k CPU cores

Hybrid architecture:

HLT1: GPUs installed in the Event Builders Servers

HLT2: CPUs in Event Filter Farm



GNNs resolution

