

LIGNÉE TECHNIQUE OU L'ÉVOLUTION D'UN INSTRUMENT

#6 L'acquisition de données en physique de particules

Les physiciens qui étudient les constituants élémentaires de l'Univers et leurs interactions cherchent souvent à détecter des événements très rares provoqués par des collisions entre des faisceaux de particules accélérés à de très hautes énergies. Pour les mettre en évidence, ils doivent observer un très grand nombre de particules et mesurer leurs propriétés. Les expériences qu'ils conçoivent génèrent ainsi d'immenses quantités d'images, de signaux électriques ou d'informations numériques qui sont sélectionnés, transmis puis enregistrés sous une forme exploitable par des systèmes d'acquisition. Ainsi, en 30 ans d'expérimentation au CERN, suivant l'évolution des lignées des matériels d'acquisition et de traitement des données, les vitesses de transfert des données acquises auront été multipliées par plus de dix millions, pour atteindre en 2023 des débits de dizaines de térabits par seconde !

Les origines

À l'aube du XX^e siècle, les physiciens étudient les rayonnements récemment découverts (α , β , γ , etc.). Utilisant des écrans fluorescents ou des chambres d'ionisation, ils comptent les taches lumineuses, les étincelles ou les signaux sonores produits par ces rayonnements dans leurs appareillages. Ces méthodes de comptage en direct demandent de longues périodes de concentration et sont éprouvantes pour les nerfs ! En 1919, A. Kovarik met au point une méthode permettant d'enregistrer automatiquement sur papier le passage des rayons β dans son détecteur. C'est la première fois que des particules sont détectées et enregistrées automatiquement. Les données expérimentales acquièrent une permanence et la mesure s'en trouve fiabilisée.

Parallèlement, sont développés des détecteurs permettant de visualiser la trajectoire des particules chargées. Dans la chambre à brouillard développée par C. Wilson (1911), les particules ionisantes forment des traînées de condensation visibles, à l'instar des avions à haute

altitude. Ces détecteurs fonctionnent de manière cyclique : un piston comprime et détend le gaz à l'intérieur de la chambre environ une fois par minute. Après chaque détente, une photographie est prise, enregistrant ainsi sur une plaque ou une pellicule les trajectoires des particules ayant aléatoirement traversé le détecteur. Peu après, mettant en application le circuit de coïncidence inventé par B. Rossi (1930), P. Blackett améliore ce dispositif en y incluant un système réalisé avec des compteurs Geiger, qui déclenche la détente de la chambre au passage d'une particule ionisante (Figure 1). Ce procédé non seulement économise temps et pellicule, mais aussi augmente le nombre des particules enregistrées par cliché, l'efficacité des compteurs Geiger s'améliorant avec le nombre de particules qui les traversent. Les images enregistrées s'en trouvent ainsi enrichies en phénomènes complexes et intéressants. Les bases des systèmes d'acquisition sont posées : les données, sélectionnées par un système de déclenchement, sont enregistrées pour être traitées ultérieurement.

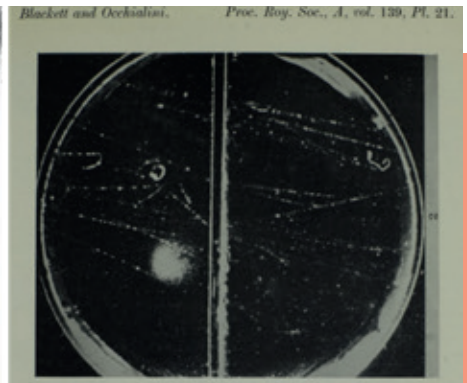
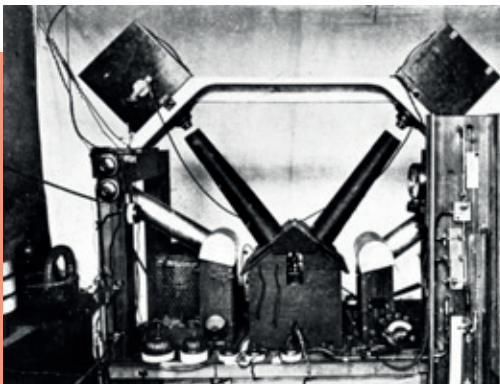


Figure 1 : à gauche, chambre à brouillard automatisée à deux appareils photo utilisée par P. Blackett et G. Occhialini (1932) (crédit The Cavendish Laboratory) ; à droite, cliché réalisé avec un déclenchement automatique (extrait de Proc. R. Soc. Lond. A139 699–726, reproduit avec l'aimable autorisation de la Royal Society). Photo © Claude Amra

● - Première rupture technologique : l'entrée en jeu des ordinateurs

La mise en œuvre de faisceaux de particules intenses et énergétiques dans les années 1950 ouvre l'âge d'or des chambres à bulles pour matérialiser la trajectoire des particules (D. Glaser, 1952). Au départ de taille modeste, les chambres à hydrogène liquide atteignent plusieurs mètres au milieu des années 1960. Avec un fonctionnement proche des chambres à brouillard, elles produisent des millions d'images d'une qualité remarquable, mais dont le traitement est long et laborieux, même s'il est peu à peu semi-automatisé grâce aux ordinateurs fraîchement apparus.

Face à cette difficulté, les physiciens explorent des méthodes de détection permettant d'enregistrer les données automatiquement sur des bandes magnétiques. Par exemple, les temps d'arrivée des sons émis par les décharges électriques déclenchées sur le passage d'une particule dans une chambre à étincelles, sont mesurés par des capteurs acoustiques, enregistrés et analysés ultérieurement à l'aide de gros ordinateurs

pour reconstruire les trajectoires des particules incidentes. Les systèmes dédiés acheminant les données vers les bandes magnétiques sont basés sur une électronique composée de tubes à vide et limitent souvent la vitesse d'acquisition. Les ordinateurs vont rapidement faire évoluer la situation. Les données des expériences sont transmises au travers de lignes téléphoniques à des ordinateurs centraux qui permettent d'accélérer l'écriture sur bandes magnétiques, mais aussi de procéder à l'analyse en ligne d'une partie des données, fournissant ainsi en direct des informations cruciales sur l'état du dispositif expérimental.

En parallèle, le système NIM^{*}, un ensemble de modules électroniques standardisés (1964), s'impose. Les modules NIM sont alimentés par des châssis dans lesquels ils s'encastrent, et communiquent entre eux par des câbles coaxiaux. De nombreux modules proposant des fonctions courantes (discriminateurs, convertisseurs, comptages, etc.) sont disponibles à l'achat. Interchangeables, configurables et réutilisables, ils facilitent grandement la conception et la mise en œuvre des systèmes de contrôle et d'acquisition. Ainsi, les expériences grandissent et combinent plusieurs types de détecteurs, et le nombre de voie de lecture augmente.

* NIM (Nuclear Instrumentation Module)



Figure 2 : Le premier ordinateur installé au CERN en 1958 : le Ferranty Mercury (crédit : CERN).

Deuxième rupture technologique : l'avènement de la microélectronique

L'arrivée des amplificateurs à transistors est une révolution. Elle permet par exemple à G. Charpak de mettre au point en 1968, la chambre multifils où la petite impulsion électrique induite sur un fil au passage d'une particule est transformée par un amplificateur et enregistrée dans une mémoire d'un circuit électronique comportant quelques portes logiques. Rapidement, les circuits dans lesquels sont implantées les fonctions d'amplification et les logiques de lecture sont de plus en plus intégrés ; leur coût baisse, leur usage se répand à tous les types de détecteurs et la quantité de données produites s'accroît. Les détecteurs de particules entrent dans l'ère de la microélectronique. Devant l'essor du volume et de la complexité des données, les systèmes d'acquisition évoluent et sont contrôlés par des ordinateurs, dont l'usage se répand. Ceux-ci doivent s'interfacer avec plusieurs cartes électroniques pour traiter les données interconnectées par l'intermédiaire d'un système de transmission normalisé. Le système CAMAC, développé pour prendre la relève du système NIM au début des années 1970, facilite l'interface entre les instruments et les ordinateurs, et se propage au-delà de la physique des hautes énergies. Une décennie plus tard, il s'avère déjà insuffisant pour les expériences les plus en pointe. De nouveaux standards plus rapides voient le jour dans les années 1980, tel le FASTBUS, lui aussi développé pour la

physique des particules, ou le VME, un standard industriel moins cher et qui tend à s'imposer. Ces nouveaux systèmes introduisent des bus de données qui transitent sur une carte à l'arrière du châssis. Chaque expérience nécessite le développement de cartes dédiées incorporant des processeurs, des mémoires, des convertisseurs analogique-numérique, des interfaces disques, etc.

Les moyens informatiques se modernisent aussi. Par exemple, dans les années 1970, le CERN développe le CERNET, un réseau innovant de transmission de données à usage très général connectant les systèmes d'acquisition de données aux ordinateurs centraux. Dans les années 1990, les stations de travail Unix remplacent les ordinateurs centraux et de nouvelles architectures informatiques se mettent en place pour faire interagir plusieurs serveurs de calculs, de bandes ou de disques.

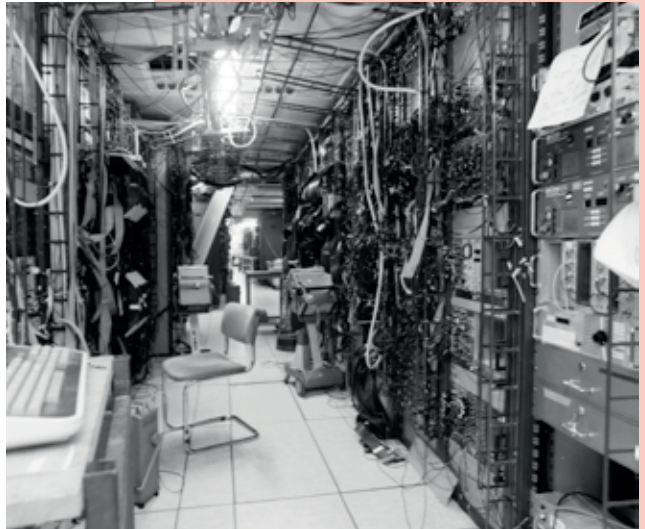


Figure 3 : La salle accueillant le système d'acquisition de l'expérience NA34 au CERN en 1986, équipée de modules VME (crédit : CERN)

▲ Troisième rupture technologique : La montée en puissance des architectures parallèles

Mis en service au CERN en 2010, le LHC, le grand collisionneur de hadrons, pose des défis majeurs aux quatre grandes expériences qui l'instrumentent. Chacune voit 40 millions de collisions de faisceaux par seconde, avec des centaines de particules créées à chaque collision. Le volume de données engendrées est phénoménal. Pour relever le défi, les expériences s'emparent des technologies développées principalement pour les télécommunications et l'industrie du jeu et du cinéma. À titre d'illustration, deux projets rattachés à l'expérience LHCb, l'une des quatre expériences du LHC, auxquels les auteurs de cette plaquette ont contribué sont présentés plus en détail : le L0Muon et la carte PCIe40 (Figure 4).

Au début des années 2000, la technologie ne permet pas encore d'extraire l'ensemble des données au rythme des collisions du LHC. Un système électronique formant le déclenchement de niveau zéro (L0) a donc été développé pour réduire le taux de lecture d'un facteur 40 en sélectionnant les événements les plus prometteurs. Le L0Muon est l'une de ses composantes majeures. Toutes les 25 ns, le L0Muon reçoit les données d'un détecteur spécialisé au travers de ~1500 fibres optiques et les traite de façon synchrone à l'aide de 48 cartes processeurs telle celle présentée ci-dessous. Chacune comporte cinq FPGA^{*}, des circuits programmables

permettant de traiter simultanément une grande quantité de données grâce à un parallélisme massif et un contrôle temporel précis du traitement. Le système effectue près de 740 milliards d'algorithmes de tri par seconde. Après 1 μ s, le L0Muon émet son résultat et la décision est prise d'envoyer ou non les données à une ferme de calcul de 2000 processeurs pour la prochaine étape de la sélection.

En 2022, LHCb est mis à jour et le volume de données multiplié par 10. Grâce aux progrès de l'électronique et de l'informatique, une ferme de calcul équipée de processeurs graphiques est désormais capable de digérer l'ensemble de ces données. Le niveau zéro du déclenchement, trop limité, est abandonné et un système d'acquisition dédié est développé. Il est composé de 500 cartes PCIe40 (ci-dessous) insérées dans les PC de la ferme. Les cartes PCIe40 recueillent les données sur environ 10000 fibres optiques, capables d'assurer un débit jusqu'à 32 Tb/s. Elles sont équipées de FPGA comportant 50 fois plus de cellules logiques que ceux du L0 et ont permis de franchir une nouvelle étape dans l'intégration des systèmes d'acquisition. Ces cartes, bien que développées spécifiquement pour répondre aux besoins de l'expérience LHCb, restent très génériques dans leur conception et ont été adoptées par plusieurs autres expériences de physique des hautes énergies.

* FPGA (Field-Programmable Gate Array)

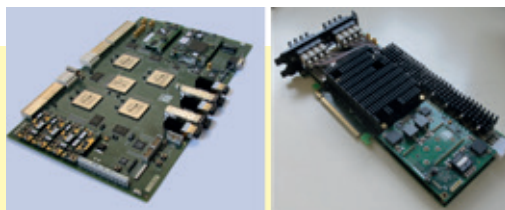


Figure 4 : à gauche, une carte de traitement du L0Muon (2007), L : 29 cm - P : 39 cm ; à droite, une carte d'acquisition PCIe40 réalisée en 2020. L : 26 cm et P : 12 cm. (crédit : Jean-Pierre Cachemiche, CPPM)

LIGNÉE TECHNIQUE* OU L'ÉVOLUTION D'UN INSTRUMENT

*Définition d'une lignée technique :

« [...] les objets évoluent selon des « lignées », c'est à dire des ensembles regroupant les objets de même type, ayant même fonction et même principe de fonctionnement ».

Bruno JACOMY

Cette plaquette s'inscrit dans un projet d'inventaire et de valorisation du patrimoine scientifique, technique et contemporain d'Aix-Marseille Université.

Contact :

**Culture et Patrimoine Scientifique
Direction de la Recherche et de la
Valorisation**

3 place Victor Hugo

13003 Marseille

corine.levy-battesti@univ-amu.fr

+33(0)4 13 94 97 29

Cette plaquette
a été réalisée
en partenariat
avec le Centre
de physique des
particules de
Marseille (CPPM)



amU
Aix Marseille Université



Auteurs : Julien Cogan, chargé de recherche et Jean-Pierre Cachemiche, enseignant chercheur recherche

Participation scientifique : J.-M. Themin, directeur du département de physique de la Faculté des sciences d'Aix-Marseille Université (amU).

José Busto : Professeur à amU / Chercheur au CPPM

Participation à la coordination du livret : Magali Damoiseaux, Responsable de la Cellule Science Ouverte et Communication, Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM, CNRS/IN2P3)

Sur une idée de Corine Lévy Battesti, ingénieure d'étude, chargée de l'inventaire des instruments scientifiques d'amU.