Algorithmes en physique des particules

Philippe CHARPENTIER
Physicien émérite, CERN, Genève

Résumé : Les expériences de physique des particules comme celles qui se font au CERN à Genève nécessitent des moyens informatiques extrêmement puissants afin de transformer les informations brutes provenant des détecteurs en données de physique analysables. Ce traitement est l'œuvre de centaines d'algorithmes qui élaborent graduellement l'information nécessaire à l'analyse. De nombreux algorithmes sont alors également utilisés dans cette phase finale d'analyse afin de séparer les événements intéressants du bruit de fond. Ces derniers sont très similaires aux algorithmes dont on parle souvent dans les moteurs de recherche ou dans les programmes d'intelligence artificielle. Nous passons en revue cette panoplie d'algorithmes utilisés à tous les étages de l'analyse de physique.

Mots-clés : physique des particules, reconstruction de données, classification, apprentissage-machine

1 Introduction

Tels Monsieur Jourdain qui faisait de la prose sans le savoir, grand nombre de scientifiques ont, depuis des décennies, utilisé des algorithmes informatiques pour traiter leurs données, sans nécessairement les nommer comme tels. Car finalement derrière ce mot devenu à la mode et parfois porteur de beaucoup de craintes, se cache un processus relativement simple : il s'agit essentiellement d'obtenir de l'information plus raffinée à partir d'une collection d'informations « brutes ».

Jusqu'à la fin du siècle dernier on n'utilisait que très peu le mot « algorithme » en physique des particules : on préférait parler tout simplement de « programme de reconstruction de données » ou « programme d'analyse de données ». Essayons de voir dans quel contexte on utilise des algorithmes pour faire de la physique… Quelle est la problématique à laquelle est confronté le chercheur en physique pour obtenir des résultats publiables ?

2 Les expériences de physique des particules

Ces expériences consistent dans la plupart des cas à faire entrer en collision des particules après leur avoir transféré une grande quantité d'énergie dans ce que l'on appelle un « accélérateur de particules ». Ces particules sont le plus souvent des constituants infinitésimaux de la matière, comme des protons ou des électrons. On peut soit les accélérer dans des directions opposées et les faire entrer en collision (on parle alors de « collisionneur de particules », tels que le LEP ou le LHC au CERN à Genève), soit les projeter sur un morceau de matière (on parle alors d'une « expérience à cible fixe »).

L'énorme quantité d'énergie que l'on fournit à ces particules dans l'accélérateur les fait approcher de très près la vitesse de la lumière, mais surtout permet lors de la collision de créer de nouvelles particules selon la formule bien connue formulée par Albert Einstein $E = mc^2$: l'énergie (E) peut se transformer en matière de masse « m ». On peut donc ainsi fabriquer de nouvelles particules qui n'existent pas dans notre environnement (constitué exclusivement de protons, de neutrons et d'électrons) mais qui jouent néanmoins un rôle fondamental dans la création et l'évolution de l'Univers. La plupart de ces particules ont des durées de vie très courtes, et donc se « désintègrent » en d'autres particules après un temps en général inférieur à une microseconde, voire beaucoup moins.

Afin de retracer ce qu'il s'est produit lors d'une collision, on installe de gigantesques appareillages qui peuvent mesurer jusqu'à 30 m de haut et de long, peser quelques milliers de tonnes et qui contiennent des millions de capteurs dont le rôle est d'enregistrer le passage de ces particules provenant de la collision. L'ensemble de ces données est enregistré par une batterie d'ordinateurs et stocké dans des centres de calcul où ils devront ensuite être traités pour reconstituer le maximum d'informations sur les particules produites dans la collision. Ces informations sont principalement : la localisation dans l'espace (position, direction), l'énergie de la particule ainsi que sa nature (électron, proton mais aussi pion, muon, kaon etc…).

C'est là qu'interviennent les premiers algorithmes : il s'agit de transformer une information brute (le signal électronique créé par les millions de capteurs, numérisé et enregistré en temps réel par toute une batterie d'ordinateurs), en une information intelligible (position, énergie, nature). En fait, chaque étape dans la quête de cette information est réalisée par une succession de nombreux algorithmes dont chacun traite une petite partie des données et produit de l'information de plus en plus élaborée.

3 Reconstruction des particules

3.1 Algorithmes de reconstruction

Prenons l'exemple de la trajectoire des particules… Lors de leur passage dans les capteurs, elles laissent une petite trace sous forme d'un petit signal électrique qui, convenablement amplifié et traité par une électronique très rapide, est ensuite numérisé. La sophistication de cette numérisation peut varier selon le besoin entre une information binaire (0/1) et une information complexe (par exemple l'intensité du signal électronique à des intervalles de temps de quelques nanosecondes). Le détec-

Published in : DELTORN, Jean-Marc ; PICHENOT, Evelyne (dir.), *Algorithmes et Société*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813003928, doi : 10.17184/eac.9782813003928

teur comportant des millions de capteurs, il convient d'abord de ne garder que les informations de capteurs ayant reçu un signal (suppression des capteurs vides). Ceci est généralement fait par des algorithmes directement implémentés dans les circuits intégrés de traitement du signal (FPGA). Ces algorithmes introduisent un codage repérant le capteur et l'information à enregistrer, et envoient ces informations dans un ordinateur central qui collecte l'information de tous les capteurs et les assemble avant de les enregistrer sur un disque dur. On obtient ainsi une information brute dont la taille peut varier de quelques kilo-octets à quelques centaines de méga-octets.

Des algorithmes de traitement de données doivent ensuite reconstituer la trajectoire de toutes les particules dans l'espace à partir de ces informations élémentaires. Ceci se fait généralement en plusieurs étapes, tout d'abord par une reconstruction locale dans des sous-ensembles de capteurs (dans un espace de quelques centimètres ou décimètres), puis en assemblant ces éléments de trajectoire jusqu'à former une trajectoire complète, parfois reconstruite sur plusieurs mètres. La densité de trajectoires peut parfois conduire à des erreurs de reconstruction (plusieurs éléments de trajectoire sont assemblés bien que ne provenant pas de la même particule), soit à des inefficacités (la trajectoire n'est pas entièrement reconstruite). Il est très important de connaître la probabilité de telles erreurs, pour pouvoir apporter ensuite des corrections aux mesures. Ceci se fait généralement en utilisant des programmes de simulation de l'appareillage dans lesquels on connaît la réalité des trajectoires et où l'on peut donc comparer le résultat de la reconstruction avec celle-ci.

3.2 Détermination des paramètres des particules

La dernière étape de traitement des trajectoires consiste à déterminer les paramètres géométriques (position et direction) et cinématiques (impulsion) de chaque trajectoire. Cette dernière information est fournie par le fait que les particules traversent un champ magnétique (créé par un gigantesque électroaimant) qui va courber leur trajectoire, et ce d'autant plus que leur impulsion est faible. La mesure de la courbure de la trajectoire est donc un élément primordial pour établir la « carte d'identité » de la particule. Cette opération d'ajustement des paramètres de la particule est faite par un algorithme complexe qui prend en compte tous les points de mesure sur la trajectoire mais aussi des informations sur le champ magnétique bien sûr et aussi sur la matière traversée par la particule (car celle-ci peut perturber la trajectoire). Pratiquement toutes les expériences de physique des particules basent cet ajustement sur le même algorithme appelé « Kalman-filter », mais dont il existe de multiples incarnations, qui sont constamment améliorées par des équipes de spécialistes, alors que les algorithmes de reconstruction sont très spécifiques de chaque expérience.

3.3 Algorithmes et multi-processeurs

Jusqu'à une période récente l'ensemble des algorithmes de reconstruction était exécuté séquentiellement sur un seul processeur d'un ordinateur. Par conséquent, les ordinateurs modernes possédant en général plusieurs processeurs (8, 32, 64…), de nombreux programmes de reconstruction s'exécutent en parallèle, chaque processeur traitant indépendamment des autres un ensemble de données, parfois provenant d'expériences différentes. Ce paradigme est encore très largement utilisé, mais peut cependant com-

Published in : DELTORN, Jean-Marc ; PICHENOT, Evelyne (dir.), *Algorithmes et Société*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813003928, doi : 10.17184/eac.9782813003928

porter des limitations dans le cas d'un très grand nombre de processeurs, car chaque programme nécessite une grande quantité de mémoire vive (typiquement 2 à 3 gigaoctets). Or la mémoire est l'élément cher dans un ordinateur, et la prolifération des processeurs dans un même ordinateur ne permet pas d'accroître la mémoire dans les mêmes proportions.

C'est pourquoi une approche nouvelle est développée depuis quelques années, utilisant le fait que les algorithmes élémentaires de traitement des données peuvent s'exécuter en parallèle sur des processeurs différents, tant qu'ils n'ont pas besoin d'informations élaborées par d'autres algorithmes. Les informaticiens-physiciens ont donc développé de nouveaux algorithmes dont le rôle est d'élaborer des stratégies pour exécuter les algorithmes de reconstruction en parallèle (ordonnancement des algorithmes). L'avantage est que la mémoire vive est partagée par tous les processeurs qui participent à la reconstruction, réduisant d'autant la quantité totale de mémoire nécessaire. Le prix à payer est que, dans ce cas, il est souvent difficile d'utiliser à 100% la puissance de calcul de la totalité des processeurs, car certains algorithmes doivent attendre pour s'exécuter que leur information d'entrée soit élaborée par les autres algorithmes : par exemple on ne peut lancer un algorithme d'ajustement des paramètres qu'une fois qu'une trajectoire a été totalement reconstruite. Par contre l'ajustement de plusieurs trajectoires peut parfaitement s'exécuter en parallèle.

On voit donc que non seulement des algorithmes doivent être développés pour traiter les informations, mais que les algorithmes eux-mêmes doivent être supervisés par d'autres algorithmes. Ceci implique que les physiciens prennent en compte le nouveau paradigme de parallélisme et fournissent aux algorithmes d'ordonnancement toutes les informations nécessaires pour déterminer quels algorithmes de reconstruction peuvent être exécutés en parallèle.

4 Algorithmes de sélection des événements

Lorsque la totalité des informations concernant les particules provenant d'une collision a été reconstruite, peut commencer l'analyse de données proprement dite : en effet, en général les physiciens doivent rechercher parmi toutes les collisions (qu'on appelle aussi « événements ») celles qui présentent un intérêt pour leur recherche, par exemple rechercher une nouvelle particule (telle le boson de Higgs) ou étudier un phénomène rare. Ces événements (appelés communément « signal ») sont par définition peu fréquents (parfois moins de un sur un milliard), mais présentent des caractéristiques particulières qui permettent de les distinguer des autres événements plus abondants. Néanmoins des événements peuvent ressembler fortement à un événement de signal sans toutefois correspondre au phénomène étudié : c'est ce que l'on appelle le « bruit de fond ». Le but de la sélection des événements est de garder le maximum d'événements de signal tout en réduisant au minimum le bruit de fond, et de pouvoir quantifier avec quelle efficacité on garde les premiers et avec quel pouvoir de réjection on se débarrasse des seconds.

Published in : DELTORN, Jean-Marc ; PICHENOT, Evelyne (dir.), *Algorithmes et Société*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813003928, doi : 10.17184/eac.9782813003928

4.1 Méthode des « coupures »

Une méthode « classique » consiste à concevoir un algorithme basé sur des quantités observables (direction, impulsion, nature de la particule etc…), en choisissant celles de ces observables qui ont des caractéristiques différentes entre le signal et le bruit de fond. On va alors définir des intervalles de valeurs pour ces observables, en faisant un compromis entre la perte d'événements de signal (donc une perte d'efficacité) et la réjection d'événements de bruit de fond. On dit alors qu'on applique des « coupures » sur les observables.

Cette méthode est en général basée sur des critères objectifs liés aux caractéristiques physiques du signal. Les coupures sont choisies en utilisant des simulations d'événements de signal d'une part et de bruit de fond d'autre part, réalisées à priori, avant même d'avoir recueilli ou étudié les données réelles. En effet, il ne faut pas que le choix des coupures soit influencé, même inconsciemment, par la connaissance des données réelles, car cela risquerait de biaiser le résultat. Les algorithmes de sélection sont donc élaborés sur des simulations, jusqu'à obtenir un compromis acceptable entre efficacité et contamination par le bruit de fond. On parle alors d'une « analyse en aveugle », car quand la sélection optimale est déterminée, on l'applique aux données réelles et on n'a plus le droit de la modifier au prétexte que le résultat n'est pas conforme aux attentes.

4.2 Réseaux neuronaux

La méthode des coupures montre bien souvent des limitations, car il n'est pas toujours facile de trouver des observables discriminantes sur lesquelles appliquer les coupures. En effet, dans l'hyper espace des observables, il arrive souvent que signal et bruit de fond, bien que relativement bien séparés, ne soient pas facilement discriminés par une simple coupure sur chacune des observables.

On a donc de plus en plus recours à des algorithmes, basés sur le principe de réseaux neuronaux, qui vont par un processus d'apprentissage optimiser la combinaison d'observables pour effectuer cette discrimination. Ces algorithmes sont très génériques et ont pour but de produire pour chaque événement un nombre, en général entre 0 et 1, qui sera d'autant plus proche de 1 que l'événement ressemblera à du signal. En gardant les événements pour lesquels ce nombre est supérieur à une valeur donnée, on peut sélectionner le signal avec une certaine efficacité, d'autant plus faible que cette valeur est grande, et une certaine contamination, également d'autant plus faible que la valeur est grande. On pourra alors choisir une valeur optimale pour que l'efficacité soit assez grande mais la contamination assez faible.

Les algorithmes de réseaux neuronaux doivent tout d'abord « apprendre » à différencier signal et bruit de fond. On leur fournit une batterie d'observables pour des lots d'événements simulés, de signal et de bruit de fond, et les algorithmes élaborent la meilleure combinaison pour obtenir la variable discriminante.

L'efficacité et la contamination sont estimées à partir de données de simulation, différentes de celles utilisées pour la phase d'apprentissage de l'algorithme. Il appartient toutefois au chercheur de choisir les observables utilisées dans la sélection avec discer-

Published in : DELTORN, Jean-Marc ; PICHENOT, Evelyne (dir.), *Algorithmes et Société*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813003928, doi : 10.17184/eac.9782813003928

nement, puisque les algorithmes sont totalement ignorants de la physique et donc de la signification de ces observables. En général les algorithmes les plus performants sont capables d'ignorer les observables qui n'apportent aucune amélioration à la discrimination. Par exemple on peut, pour tester cette faculté, inclure dans les observables des informations qui n'ont aucune chance de permettre une discrimination, comme la date et l'heure, ou le numéro de séquence de l'événement. Si un algorithme trouve à de telles observables un quelconque pouvoir discriminant, il vaut mieux s'en méfier. De même, il faut éviter un sur-apprentissage de l'algorithme, ce qui pourrait arriver si on lui fournit un trop grand nombre d'événements simulés.

Tout comme dans la méthode des coupures, les algorithmes de sélection sont élaborés sans s'intéresser aux événements réels, pour éviter tout risque de biais volontaire ou involontaire.

4.3 Algorithmes de classification

Les fameux « algorithmes » qui font tant parler d'eux en nous inondant de publicités non sollicitées dans nos courriels ou sur les pages des réseaux sociaux utilisent eux-mêmes des méthodes de classification, basées sur toutes les informations qui sont collectées sur nos habitudes de navigation sur le Web, sur nos achats ou visites de sites antérieures ainsi bien sûr que sur la multitude de sites Web qu'ils parcourent inlassablement.

On s'est donc également intéressé à ce que de tels algorithmes pourraient faire pour discriminer des événements de physique. Ceci a pu se faire dans le cadre d'une collaboration avec des équipes chargées du développement de ces algorithmes dans une grande entreprise d'informatique qui développe des moteurs de recherche, car il est hors de question que ces entreprises de pointe dans ce domaine fournissent le code de leurs algorithmes aux physiciens. C'est donc l'inverse qui s'est passé : des lots d'événements de signal et de bruit de fond ont été communiqués à ces experts qui n'ont donc aucune idée de la signification des observables communiquées.

Ils ont alors « appris » à leurs algorithmes à discriminer les événements de signal de ceux de bruit de fond, tout comme ils le font habituellement avec nos informations personnelles… Les résultats ont été extrêmement encourageants, obtenant une efficacité et une réjection aussi bonne que les algorithmes plus classiques développés par des chercheurs qui y incluent leur connaissance de la physique.

Malheureusement il n'est pas encore vraiment possible de publier des résultats basés sur ce type de sélection, car il doit être possible de reproduire toute analyse publiée, ce qui n'est pas possible avec des algorithmes qui ne peuvent pas être distribués publiquement. Néanmoins il est intéressant de constater qu'il est possible, sans aucune connaissance de la finalité de physique, de sélectionner des événements avec des tels algorithmes. Est-ce pour autant rassurant pour ce que ces entreprises font de nos données personnelles ?

Published in : DELTORN, Jean-Marc ; PICHENOT, Evelyne (dir.), *Algorithmes et Société*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813003928, doi : 10.17184/eac.9782813003928

5 Conclusion

De la reconstruction de base des trajectoires des particules à la sélection des événements permettant la publication de résultats de physique, les chercheurs élaborent ou exploitent des milliers d'algorithmes. Dans la plupart des cas, ceux-ci sont développés spécifiquement pour la recherche, mais des algorithmes développés dans un tout autre contexte, comme le développement de moteurs de recherche, ont montré qu'ils pouvaient fort bien être utilisés avec succès.

Published in : DELTORN, Jean-Marc ; PICHENOT, Evelyne (dir.), *Algorithmes et Société*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813003928, doi : 10.17184/eac.9782813003928