



Éloge philosophique du Grand Collisionneur de Hadrons.

Esquisses d'une philosophie de l'instrumentation scientifique.

Vincent Bontems. LARSIM

L'« être-au-monde » du LHC.

La mise en service du Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) au CERN constitue un événement marquant de l'histoire de la physique en ce début de XXI^e siècle. La communauté des physiciens des particules attend avec impatience les résultats des mesures effectuées par ce nouvel accélérateur de protons à des énergies jamais produites auparavant, en premier lieu pour achever le « modèle standard »¹ en détectant notamment le « boson de Higgs » qui en est la clef de voûte, mais aussi pour repousser l'horizon expérimental d'observation afin d'étayer ou d'affaiblir les prétentions des différentes théories qui s'élaborent déjà au-delà de ce cadre théorique. Les philosophes des sciences sont sensibles à cette dimension épistémologique de l'événement : grâce au LHC, la correspondance entre la théorie physique et l'expérience progresse au point où l'on entrevoit la saturation du cadre actuel, tandis que se profile la possibilité d'une mise à l'épreuve des avant-gardes théoriques. Avec le LHC, la pensée se situe donc aux frontières de la science normale, là où elle peut encore gagner en stabilité ou, au contraire, redevenir métastable par rapport à une nouvelle théorie plus adéquate à la réalité découverte. Ces enjeux sont fascinants et ils éclairent la nature du LHC en tant qu'instrument de connaissance, mais sans en faire lui-même un « objet de réflexion ».

¹ On appelle « modèle standard » le cadre théorique qui décrit les constituants de la matière : il y a, d'une part, les quarks, par trois dans chaque nucléon, soumis à des interactions fortes, d'autre part les leptons, tels que l'électron et le neutrino, qui interagissent entre eux et avec les quarks à travers le champ électrofaible.

Les poncifs de la vulgarisation scientifique ne rendent pas non plus justice à la réalité concrète du LHC. Le déferlement des superlatifs qualifiant ses performances occulte en fait la nature de la prouesse technologique qui les rend possibles, les comparaisons avec de massifs monuments historiques pour mettre en valeur le gigantisme de la machine laissent échapper la spécificité de la grandeur du LHC (qui réside dans sa haute technicité), l'insistance déplacée sur la compétition internationale avec les grands appareils américains ne donne pas une idée juste du rayonnement universel de son aura. Ces informations ne sont pas pertinentes quant à son fonctionnement, ni même quant à la nature de l'émotion qui émane de sa singularité. Face à la complexité et l'opacité des grands appareils de la science contemporaine, le discours savant se résigne trop souvent à ne présenter de la technique que des aspects superficiels, inessentiels. Cette description de surface n'apprend pas davantage qu'une photographie en quoi consiste la technicité d'une machine, sa valeur technologique.

Pour envisager philosophiquement le LHC lui-même, il est nécessaire de l'examiner à travers la singularité des relations qu'il entretient avec notre monde. Les philosophes se sont souvent intéressés à l'« être-au-monde » en partant de leur propre expérience de l'existence. Beaucoup plus rares sont ceux qui, comme Gilbert Simondon, ont proposé d'analyser « le mode d'existence des objets techniques »². Se mettre à la place d'un objet technique, c'est le réinventer, penser les conditions de son insertion dans le monde. Pour cela, la philosophie des techniques combine, d'une part, des analyses mécanologiques et, d'autre part, des analyses psychosociales. Les premières tentent de dégager la spécificité des opérations de chaque machine, ses différents niveaux d'organisation, et le sens des évolutions technologiques. Les secondes examinent les modalités d'intégration des objets techniques dans le milieu social et culturel. Réengager ce type d'analyses sur un dispositif tel que le LHC, c'est se donner le moyen de les réactualiser au contact de la plus haute technicité, et aussi contribuer, puisqu'il s'agit d'une « machine à comprendre le monde », au développement d'une épistémologie de l'instrumentation scientifique, telle que la réclame Davis Baird³. Sans remplir cette ambition, notre petit éloge du LHC vise à esquisser cinq aspects fondamentaux de son *être-au-monde*.

En premier lieu, il s'agit de prendre conscience de l'importance des grands instruments de la physique des particules. Ces dispositifs d'observation, que Gaston Bachelard qualifiait de *phénoménotechniques*, ne sont plus de simples instruments prolongeant notre perception, ils sont l'accès indispensable à certaines potentialités du monde. Le LHC est une « fabrique

² Gilbert SIMONDON, *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 1989.

³ Davis BAIRD, *Thing Knowledge. A Philosophy of Scientific Instruments*, Berkeley, University of California Press, 2004.

des phénomènes»⁴. Il représente la concrétisation technologique d'un nouveau seuil de médiation entre les horizons des théories et l'horizon expérimental. C'est pourquoi il semble nécessaire, à côté de l'expérience et de la théorie, de faire une place à un troisième pôle de la recherche, un « pôle intermédiaire » pour ainsi dire, l'instrumentation. Il ne s'agit pas simplement de rappeler que les instrumentalistes constituent, du point de vue sociologique, une catégorie distincte de physiciens par rapport aux théoriciens et aux expérimentateurs, mais surtout de relever la nécessaire prise de conscience philosophique de l'importance de l'instrumentation scientifique comme *médiation entre l'homme et le monde*.

Alors, il ne faut négliger ni la matérialité ni la technicité de cette médiation. On croit toujours que la construction d'un *appareil objectif* va de soi, qu'il est légitime en exposant des connaissances d'oublier les difficultés liées à la concrétisation du dispositif expérimental pour passer directement du problème théorique au résultat final de l'expérience. Nous entendons prendre le contrepied de cette attitude et célébrer déjà le LHC comme un accomplissement en soi. La somme des exigences, des efforts et des précautions techniques fait partie intégrante du processus scientifique. Le LHC ne doit surtout pas être traité comme une « boîte noire » : les expériences qui y sont effectuées sont incompréhensibles tant qu'on n'a pas exposé son principe de fonctionnement. Le discours sur la technologie a la réputation d'être ennuyeux, nous montrerons qu'à dose homéopathique il éclaire la structure du LHC, ses opérations et ses niveaux de technicité. L'ensemble des technologies du LHC ne prend sens que par la manière unique dont elles génèrent *un milieu artificialisé aux limites des possibilités naturelles*.

L'aspect le plus fondamental de l'être-au-monde du LHC réside dans la singularité de l'observation du monde qu'il rend possible. Les énergies libérées lors des collisions recréent artificiellement les conditions naturelles qui prévalaient dans l'univers primordial, c'est-à-dire à une phase inchoative de ce monde, hautement énergétique. En philosophe de la nature, nous dirons que l'opération du LHC réactualise la *préindividualité* des protons et qu'il étudie la cascade d'individuations de particules plus ou moins stables qui résulte des collisions entre les quarks et les gluons. Les détecteurs sont l'interface matérielle entre ces « événements », les collisions, et l'information directe ou indirecte sur les trajectoires fugaces des particules émises. Alors que le sens commun voudrait que l'observation précède le raisonnement, l'observation du Higgs ne sera obtenue qu'au terme du traitement statistique des masses d'informations produites par les complexes dispositifs d'interaction avec les particules émises que sont les détecteurs du LHC. Ainsi, la structure topologique du Solénoïde Compact à

⁴ Gaston BACHELARD, *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951, p. 143.

Muons (CMS), où chaque couche vise à interagir avec certaines particules émises lors de la collision, illustre la complexe opération qui rend possible ce *point de vue au cœur du monde*.

La méthode de la mécanologie préconise de fonder la connaissance d'une machine sur la réinvention de ses opérations. Elle suppose aussi d'examiner son degré de concrétisation par rapport aux machines qui reposent sur le même principe de fonctionnement. Il est instructif de considérer le LHC au sein de la lignée technologique à laquelle il appartient, celle des accélérateurs de protons, pour apercevoir en quel sens il mérite le titre de *dernier accélérateur au monde*. D'une part, la perspective généalogique correspond à une réalité psychosociale au CERN : les ingénieurs qui construisent un accélérateur le font toujours pour dépasser les performances des modèles antérieurs et en pensant déjà à la programmation du prochain stade de concrétisation. D'autre part, un cycle s'achève peut-être, car le LHC semble couronner la stratégie de développement des grands appareils, et l'on ignore si ses résultats justifieront un investissement plus important dans la course aux très hautes énergies. L'une des hypothèses est que les lignées technologiques évoluent par des phases alternées d'adaptations graduelles mineures et de reconfigurations discontinues majeures qui obéissent à un rythme de relaxation distinctif. Une prospective d'ordre technologique peut alors alimenter les réflexions sur le devenir du champ de la physique des particules après le LHC.

Nous avons eu la chance de visiter les installations du LHC avant sa mise en service, et de voir ainsi l'un de ses imposants détecteurs, CMS, quand l'assemblage n'était pas achevé, que le « monstre » laissait encore entrevoir ses entrailles et que la boîte noire ne s'était pas encore refermée. Nous étions accompagnés d'un de ses concepteurs et chacune de ses phrases d'explication laissait transparaître l'amour qu'il portait à « sa » machine, tellement il était en intelligence avec elle. On peut être touché par cette fierté, car il n'y a pas de raison que nos rapports avec les objets techniques soient dépourvus d'affectivité quand il s'accompagne d'une telle intimité. La dimension symbolique du LHC repose cependant, pour la plupart des gens, non sur la proximité mais sur l'aura de sa singularité, qui l'éloigne de nous comme il le sépare du reste des réalisations technologiques. L'aura du LHC tient à la « pureté » de sa technicité, et mérite d'être défendue contre les interprétations vulgaires. Le LHC est une réalisation technologique *majeure*, non seulement par l'ampleur du chantier qu'il a représenté, mais surtout au sens où il pousse à leurs limites les possibilités technologiques de notre temps. Il représente le *nec plus ultra*. C'est aussi, et surtout, une technologie « désintéressée » au sens économique du terme, dénuée de finalité utilitaire. Il incarne pour cette raison la collaboration œcuménique de toute l'humanité sous l'égide de la connaissance universelle. En ce sens, le LHC mérite bien de figurer au nombre *des merveilles du monde contemporain*.

La médiation entre l'homme et le monde.

L'exploration de hautes énergies encore jamais atteinte sera l'occasion de corroborer, de compléter, voire de rectifier, le *modèle standard* qui constitue le « référentiel »⁵ théorique actuel de la physique des particules. C'est du moins ce qu'escomptent les physiciens si le LHC parvient à détecter la pièce manquante, le fameux boson de Higgs. Mais l'extension de l'horizon expérimental est aussi de nature à entraîner d'autres découvertes et à éprouver la testabilité de théories qui prétendent aller au-delà de l'horizon théorique de ce référentiel. Il serait exagéré, pour autant, de considérer le LHC comme l'instrument fatal de la falsification des théories, car, s'il permet d'en contrôler les prédictions, certaines sont en quelque manière *ajustables* et capables par conséquent d'intégrer après coup les contraintes expérimentales.

Le rôle du LHC est plus positif que ne le supposerait une épistémologie strictement poppérienne. Ses hautes énergies font progresser suffisamment l'horizon expérimental pour que l'horizon théorique du modèle standard soit saturé, et pour que les indices d'un autre référentiel puissent surgir. Le LHC matérialise le *principe de technicité* mis en évidence par Ferdinand Gonseth dans la production de la connaissance : un problème est formulé dans un référentiel, des hypothèses sont élaborées dans ce référentiel pour le résoudre, elles sont ensuite mises à l'épreuve de la réalité, et l'information tirée de ces expériences sert à reconsidérer la formulation du problème, voire à changer de référentiel. Or, la troisième phase du cycle, l'expérimentation, suppose toujours un dispositif technique, un instrument de mesure d'une précision suffisante pour que l'expérience ait un sens en regard des prédictions issues des hypothèses théoriques. Le LHC repousse les limites de l'adéquation entre horizons théorique et expérimental. Que cette nouvelle adéquation précise et stabilise le référentiel actuel ou qu'elle le déstabilise et le rende métastable par rapport à d'autres, le LHC aura de toute façon servi à l'avènement d'un référentiel plus *idoine* au sens de Gonseth.

⁵ Ferdinand GONSETH, *Le référentiel, univers obligé de médiation*, Lausanne, L'âge d'homme, 1975.

Si la physique repose sur la concordance entre la théorie et l'expérience et que celle-ci est matérialisée et contrôlée par la technique depuis Galilée, la philosophie des sciences ne saurait ignorer la profonde transformation des conditions techniques de l'expérimentation survenue depuis qu'il fit rouler une balle sur un plan incliné : les phénomènes pris en compte par la science contemporaine sont artificiellement produits par des appareils sophistiqués qui sont en eux-mêmes des « théories matérialisées ». Un dispositif d'expérimentation tel que le LHC constitue une matérialisation de la science d'autant plus raffinée qu'il est de la plus haute précision : il représente la forme la plus accomplie du principe de technicité dans la physique des particules.

Toutefois, ces grands instruments que sont les collisionneurs ne sont plus seulement des instruments de mesure qui prolongent notre perception : ils provoquent les phénomènes avec lesquels ils interagissent, et ils permettent l'observation d'événements qui, sans eux, n'auraient pas lieu à la surface de la terre. Cela autorise le rapprochement avec la notion de *phénoménotechnique*, développée en son temps par Gaston Bachelard⁶, pour décrire la nature de l'observation en microphysique : la science ne se fonde plus sur une « phénoménologie » découlant de l'observation directe des phénomènes, mais sur le contrôle technologique d'une interaction avec une réalité sans cela inobservable : une science d'effets plutôt que d'objets. Le LHC ne sert pas à l'observation de « choses » ; il actualise des potentialités enfouies au cœur de la nature. Ce que les physiciens entendent établir au LHC n'est pas la correspondance immédiate entre un concept entièrement déterminé et un objet préexistant : ils ignorent quel est précisément la masse du boson de Higgs. Mais, ils savent comment il se manifestera au LHC selon qu'il sera plus ou moins lourd. Le LHC n'est pas que l'application de principes antérieurs : son fonctionnement prouve l'existence de certaines structures naturelles.

Ainsi, l'instrumentation scientifique, conditionnée par la connaissance du sujet, est en même temps la condition de la connaissance de l'objet. La matérialité irréductible de cette médiation invite à ne pas accepter comme allant de soi que la connaissance se réduit à une relation abstraite entre les pôles de l'expérience et de la théorie. Entre les horizons théorique et expérimental intervient forcément une médiation concrète. Il semble qu'il faille faire droit à cette réalité intermédiaire de l'instrumentation dont le degré de technicité maximal fixe l'horizon de la médiation entre les horizons théoriques et l'expérience. Ce sont les progrès de la phénoménotechnique qui déterminent les conditions de la révisibilité de l'adéquation entre les horizons théoriques que nous élaborons et l'horizon expérimental qu'offre la nature.

⁶ G. BACHELARD, *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934, p. 17.

Sans dispositif phénoménoteknik, il n'y aurait pas d'interaction entre l'observateur et le phénomène : « la machine prolonge et adapte l'un à l'autre sujet et objet, à travers un enchaînement complexe de causalités. Elle est outil en tant qu'elle permet au sujet d'agir sur l'objet, et instrument en tant qu'elle apporte au sujet des signaux venus de l'objet ; elle véhicule, amplifie, transforme, traduit et conduit dans un sens une action et en sens inverse une information »⁷. L'homme a besoin des machines pour expérimenter à sa place, entrer en relation avec des échelles d'énergies, de temps et d'espace, qui dépassent de loin ses capacités sensorielles. La notion même d'observateur s'en trouve décentrée par rapport au sujet de la perception autant que l'objet quantique l'est par rapport à l'objet classique. En toute rigueur, c'est la machine qui observe le monde, dans la mesure où c'est elle qui entre en relation directement avec les phénomènes : « La position de l'homme et la position de la machine ne sont pas symétriques par rapport à l'objet : la machine a une liaison immédiate à l'objet, et l'homme une relation médiée »⁸. En même temps que les progrès de l'instrumentation ont approfondi l'observation de la nature et décentré l'observateur par rapport au sujet, les théories physiques ont décrit les structures fines de la matière en développant des formalismes de plus en plus abstraits et en rupture avec les évidences intuitives. Ce double processus de décentrement, par rapport aux concepts classiques de sujet et d'objet, correspond à l'extension progressive des horizons expérimentaux au-delà du champ de la perception

La phénoménoteknik constitue ainsi une médiation entre l'homme et le monde en même temps qu'elle institue une médiation à l'intérieur même du monde. Au-delà de son irréductible et imposante présence à notre échelle, au-delà des informations qu'il fournira sur la réalité microphysique, le LHC doit être pensé comme la médiation entre des échelles qui sans lui seraient incommensurables : « C'est sans doute en partie ce rôle d'intermédiaire de l'instrument qui le fait si peu apparaître alors qu'il joue un rôle capital ; la perception, le savoir et l'action se situent aux niveaux bien définis des différents ordres de grandeur, alors que les instruments, ces intermédiaires ou adaptateurs, disparaissent du champ du savoir et de l'action, si bien que cette sorte d'objets ou de prolongements de l'opérateur sont rarement étudiés pour eux-mêmes »⁹. Gigantesque anneau où tournoient d'infimes particules, le LHC est aussi, pour le philosophe, une *machine révolutionnaire*... au sens où il transforme nos habitudes de pensée : le LHC oblige à penser la relativité des schèmes perceptifs développés à notre échelle et la réalité des relations entre les différentes échelles.

⁷ G. SIMONDON, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris, Millon, 2006, p. 523.

⁸ SIMONDON, 2006, p. 523.

⁹ G. SIMONDON, *L'homme et l'objet*, inédit, 1975.

Un monde artificialisé aux limites du possible.

Le LHC n'est pas « une » machine. C'est un vaste ensemble technologique aux détails si complexes qu'il décourage toute velléité de description intégrale. Seul un aperçu de son fonctionnement est cependant à même d'éclairer sa structure d'ensemble. Le principe d'un collisionneur de protons est de propulser des protons en les déviant à l'aide de puissants champs magnétiques, de leur conférer une énorme énergie en les accélérant (en fait, en augmentant leur inertie), avant de provoquer une collision entre deux faisceaux de même énergie circulant en sens inverse, cela afin d'observer les particules émises lors de la collision du fait de la conversion de l'énergie en matière. L'avantage du mode opératoire des collisionneurs par rapport à celui des accélérateurs sur cibles est qu'une particule de grande énergie venant frapper une particule immobile lui transmet une grande partie de son énergie cinétique alors qu'une collision frontale entre deux faisceaux libère davantage d'énergie.

À la complexité du monde technologique qui se met en place autour de l'opération du LHC correspond l'insertion du LHC, comme milieu artificiel, au sein du monde naturel. Le LHC est le plus grand des collisionneurs de protons : il prend place dans un anneau souterrain de vingt-sept kilomètres de circonférence. *A priori*, sa taille ne devrait pas avoir d'importance puisque les particules peuvent être accélérées autant de fois qu'elles effectuent de tours (alors qu'elles ne sont accélérées qu'une seule fois dans un accélérateur linéaire). Mais, plus les particules gagnent d'énergie, plus elles requièrent un champ magnétique puissant pour être déviées. Si bien qu'un long parcours à faible courbure est préférable à un petit cercle pour élever le seuil de l'accélération maximale. La taille du LHC résulte de multiples contraintes, elle lui est imposée par la médiation qu'il instaure au sein du monde. Il sera capable, à terme, d'accélérer les faisceaux de protons jusqu'à leur conférer une énergie cinétique de 7 tétra-électron-volt (TeV), leur collision libérant de l'ordre de 14 TeV. Pour donner une idée de comparaison : le Tevatron (collisionneur proton-antiproton) du Fermilab culmine à 2 TeV.

La réalisation d'un dispositif capable d'une telle performance représente un bond technologique. Sa conception est inventive ; elle survient après que les machines antérieures ont été poussées à leurs limites. Outre la taille du dispositif, la cryogénisation des aimants et des cavités constitue l'innovation qui explique la hausse des performances. Par rapport aux accélérateurs antérieurs, le LHC marque un saut technologique majeur : il ne s'agit pas d'une amélioration, mais d'une reconfiguration globale de la structure assurant le fonctionnement. L'appareil installé auparavant dans le grand anneau du CERN, le Large Electron-Positron Collider (LEP), produisait une collision entre un électron et son antiparticule, le positron. Or, une particule et une antiparticule se comportent de manière inverse quand elles sont soumises à un champ magnétique, ce qui permet de les faire tourner en sens contraire dans le même anneau. Comment obtenir un résultat analogue avec des protons ? Le CERN dispose déjà, avec l'Intersecting Storage Rings (ISR), d'un collisionneur proton-proton. Toutefois, comme son nom l'indique, l'ISR consiste en *deux* circuits s'entrecroisant, dispositif impossible à reproduire dans l'anneau du LEP. La solution adoptée, appelée « deux-en-un », n'est pas une optimisation, elle surmonte les exigences apparemment contradictoires de faire transiter deux faisceaux de protons en sens inverse dans le même circuit et de les soumettre à des champs magnétiques opposés. La solution consiste à supposer le problème résolu en faisant circuler les deux faisceaux à *l'intérieur même de l'aimant*, dans deux conduites ultravides situées symétriquement de part et d'autre de son centre magnétique afin de recevoir des effets de champ opposés. Cette reconfiguration entraîne une série d'autres convergences fonctionnelles dans la structure : les aimants sont feuilletés par des plaques de métal qui renforcent leur structure pour empêcher le puissant champ magnétique d'écraser les conduites, ces plaques guident en même temps ce champ magnétique et l'empêchent de déborder hors de l'aimant.

L'accélération des protons pose aussi problème : comment accélérer des particules de même charge en sens inverse ? La solution est trouvée cette fois dans une reconfiguration de la structure temporelle plutôt que spatiale. La polarité électrique des cavités accélératrices alterne à très hautes fréquences de manière à être en phase avec le faisceau qui les traverse. De même l'intensité du champ magnétique produit par les aimants est modulée dans le temps : elle augmente au fur et à mesure que les protons gagnent en énergie de manière à leur faire suivre toujours la même trajectoire circulaire. Le circuit constitué par la succession des polarisations et des accélérations est assuré par tout un *ensemble technologique* d'aimants et de cavités accélératrices. Un *ensemble* technique est un dispositif constitué de plusieurs machines dont les opérations techniques exigent la séparation relative entre différents milieux artificiels. Une forge est un exemple d'ensemble technique au stade artisanal : le four où le

métal est chauffé, l'enclume où il est modelé, la trempe où il est refroidi, la roue où il est aiguisé, sont autant de milieux associés isolés à travers lesquels l'objet transite durant sa prise de forme technique. La plupart des usines sont des exemples d'ensembles industriels. Les laboratoires reposent aussi sur le principe du cloisonnement des milieux artificiels. Le LHC est un ensemble *technologique* parce que son opération met en relation des ordres de grandeur éloignés : la trajectoire de particules hadroniques est réglée par une succession extrêmement précise de milieux artificiels générés par d'énormes aimants.

Le faisceau de protons se propage ainsi dans un tube ultravide où il est soumis aux polarisations magnétiques des dipôles qui le dévient, des quadrupôles qui le focalisent, des sextupôles qui empêchent certaines résonances d'apparaître, avant de subir une focalisation finale, par des aimants encore plus puissants à l'entrée des détecteurs, juste avant que la collision ne libère ses gerbes de particules. Chaque élément de cet ensemble est lui-même d'une technicité effarante. Les quelques 1700 aimants qui guident les faisceaux de protons sont les plus puissants jamais créés. Ils sont constitués de bobines faites d'un câble électrique supraconducteur, où le courant se propage sans rencontrer la moindre résistance et donc sans perdre d'énergie. De tels aimants ne sont réalisables qu'avec un alliage de métaux devenant supraconducteur à une température proche du zéro absolu ($-271^{\circ}\text{C}/1,8\text{ K}$). Pour fonctionner, ils requièrent comme milieu technique associé des conditions artificielles extrêmes, aux limites des potentialités naturelles : ils sont plus froids que l'espace intersidéral. Cela implique un gigantesque système de refroidissement à base d'hélium liquide tout au long des 27 kilomètres de l'accélérateur. On constate encore sur cet exemple que la structure du LHC constitue la résolution du problème des conditions de son opération dans le monde naturel.

L'articulation entre les différents milieux artificiels dans cet ensemble technologique devient à son tour un problème : pour alimenter des aimants supraconducteurs aussi froids avec des câbles électriques chauds sans dissiper trop d'énergie, il a fallu développer la production industrielle de céramiques, supraconductrices à des températures moins basses, qui servent de milieu intermédiaire. On saisit ainsi le dynamisme et les résonances internes qui parcourent un ensemble technologique : les exigences de son fonctionnement fixent un niveau de technicité qui se communique à l'ensemble des éléments qui le composent et exige d'eux le même degré de concrétisation. Le LHC engendre un monde de technologies solidaires les unes des autres. Cette transduction de la technicité se manifeste jusque dans le développement accidentel de dispositifs auxiliaires comme la « balle de ping-pong ». Le secteur 7-8 de LHC ayant été le refroidi puis réchauffé, les équipes du CERN ont décelé un défaut sur une interconnexion : un module enfichable assurant la continuité électrique de la chambre à vide

avait été endommagé par les dilatations et contractions engendrés. Les cryostats de ce secteur ont donc été rouverts et la radiographie a révélé d'autres modules défailants. La perspective de renouveler l'opération pour localiser une avarie était inacceptable en raison de sa difficulté et de sa durée (trois semaines pour ouvrir et cinq pour refermer). La solution a été d'inventer un instrument électronique ayant la forme d'une balle de 34 millimètres de diamètre (d'où son surnom) renfermant un émetteur et que l'on put introduire et faire circuler à l'intérieur des conduites afin de déterminer à quel endroit précis se situait l'élément défectueux.

Nous pourrions indéfiniment poursuivre l'analyse de l'inventivité et de l'ingéniosité à l'œuvre dans la concrétisation du LHC. Sa richesse technologique est telle qu'en chacune de ses parties on trouverait de quoi illustrer la fécondité de la mécanologie. Le point que nous entendons établir est que l'immensité, les frontières imprécises, et l'opacité qui semblaient décourager toute appréhension claire du LHC de prime abord, prennent un autre sens à la lumière de la technicité : ce sont les exigences internes de la technique qui déterminent les dimensions, la réticulation et les niveaux d'organisation du LHC. La technicité ne prend sens, à son tour, que si l'on restitue les contraintes naturelles auxquelles elle répond, les tensions qu'elle résout et les difficultés qu'elle surmonte. Comprendre le mode d'existence du LHC, c'est donc réinventer son opération, retrouver les gestes de l'intelligence incorporés dans sa structure, en fonction de la place unique qu'il occupe dans le monde naturel. La description du LHC cesse alors d'être une fastidieuse énumération de machines et de performances pour devenir une histoire édifiante, la résolution progressive de problèmes qui dérivent tous de la nécessité de produire un milieu artificiel aux limites des potentialités naturelles.

Un point de vue au cœur du monde naturel.

L'opération du LHC consiste à produire la collision de deux faisceaux de protons. Elle suppose une artificialisation extrême du milieu associé aux particules. L'ensemble de ces milieux artificiels vise toutefois, du point de vue phénoménotechnique, à produire des conditions « naturelles », à étudier les potentialités de notre monde. Les collisions produites au cœur palpitant des détecteurs du LHC sont un point de vue sur l'individuation primordiale. En concentrant autant d'énergie en un événement aussi bref, l'accélérateur permet, en effet, de « remonter le temps », c'est-à-dire de recréer localement, durant un très court laps de temps, les conditions physiques qui prévalaient dans l'univers primordial. Le niveau d'énergie était si élevé alors que les particules élémentaires confinées au sein des protons, les quarks et les gluons, évoluaient librement. Le LHC recrée artificiellement des potentialités naturelles révolues dans l'univers actuel. L'état plasmatique ainsi engendré est l'état physique le plus proche de ce qu'un philosophe de la nature simondonien nommerait la « préindividualité » : une surabondance énergétique antérieure à la genèse des individus physiques.

En ce qui le concerne, Simondon ne connaissait de la mécanique quantique que ce que pouvait lui enseigner Yves Rocard à l'ENS dans les années quarante. On considérait encore les protons comme des particules élémentaires. Il faut donc accomplir une réactualisation de sa théorie de l'individuation, en fonction de l'état actuel de la théorie quantique des champs, si l'on veut trouver un point d'accroche à son intuition de la préindividualité. Le proton est une particule composite, constituée de quarks et de gluons. Le LHC étudie le résultat des collisions quark-quark, quark-gluon, et gluon-gluon. Le but de la collision des protons n'est cependant pas de les faire « éclater », mais de provoquer l'individuation d'autres particules. En vertu de l'équation relativiste $E=mc^2$, l'énergie cinétique accumulée se convertit en matière lors de la collision et engendre la création de particules, dont certaines instables ne tarderont pas à se désintégrer en d'autres particules moins énergétiques, dont certaines susceptibles de se désintégrer à leur tour, jusqu'à ce que l'énergie libérée se soit dissipée.

L'observation de ces particules fugaces relève des détecteurs. Si, du point de vue mécanologique, le LHC est un ensemble plutôt qu'un individu, ses détecteurs sont davantage des individus que des éléments : ils combinent plusieurs instruments interagissant avec les particules produites lors des collisions. Leur structure est déterminée en fonction des informations à obtenir sur ces « événements ». Les stratégies diffèrent selon les détecteurs. Il y en a quatre principaux : Solénoïde Compact à Muons (CMS), A Thoroidal LHC ApparatuS (ATLAS), A Large Ion Collider Experiment (ALICE), le LHCb, et deux autres plus modestes, TOTAL Elastic and diffractive cross section Measurement (TOTEM) et LHCf. Chacun d'eux mériterait une analyse approfondie, dont nous ne donnerons ici qu'une esquisse en ce qui regarde CMS, que nous avons la chance de visiter avant sa mise en service.

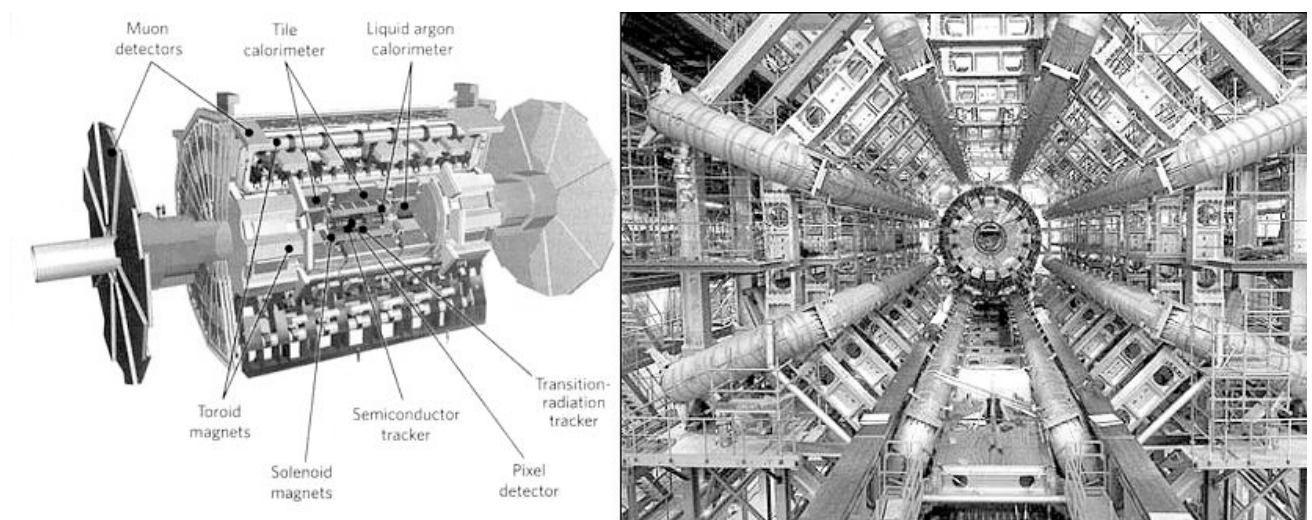


Figure 1 : Schéma écorché de CMS et photographie de sa cavité intérieure.

CMS est un cylindre hermétique de 22 mètres de long pour 14 mètres de diamètres qui pèse 12500 tonnes, d'où le nom de « compact », qui fournit une information sur la stratégie adoptée dans ce dispositif expérimentale : CMS présente une série de couches extrêmement denses autour de son cœur palpitant, chaque couche constituant une détection pour un type de particules différent ou pour une caractéristique différente de ses particules (spin, masse, impulsion, charge...). En partant du point de collision vers l'extérieur, on trouve, d'abord, une couche de silicium constituée de 60 millions de détecteurs dont l'activation permettra de calculer la trajectoire des particules chargées au plus près du point d'interaction ; puis, une couche de plusieurs milliers de cristaux (transparents) de tungstate de plomb formant un calorimètre électromagnétique qui mesure l'énergie des particules chargées ; ensuite, une

couche très dense, contenant beaucoup de fer, qui est un calorimètre hadronique, c'est-à-dire un détecteur sensible aux particules composées de quarks (protons, neutrons, pions, kaons et hyperons) ; puis, le solénoïde lui-même, le plus gigantesque aimant supraconducteur jamais construit, consistant en une bobine de 12,5 mètres pour un diamètre interne de 6,3 mètres. Les particules émanant de la collision possèdent une vitesse et une énergie telles que pour espérer en courber la trajectoire de manière significative, et obtenir ainsi une information sur leur charge, il faut produire un champ d'une intensité de quatre teslas, c'est-à-dire cent mille fois plus puissant que le champ magnétique terrestre. Enfin, une dernière couche, la plus volumineuse, est constituée par le « système à muons », soit mille quatre cents chambres à muons réparties dans les parties externes du « tonneau » et des « bouchons » de CMS. Elle alterne quatre sous-couches de matériau métallique lourd qui « freine » ce type de particules et quatre sous-couches de chambres remplies de gaz ionisable où l'on peut détecter le passage de leur charge. CMS combine donc plusieurs phénoménotecniques : des *trajectographes*, permettant de calculer la trajectoire d'une particule chargée, des *calorimètres*, qui absorbent une part de l'énergie d'une particule pour la mesurer, et des *identificateurs* de particules.

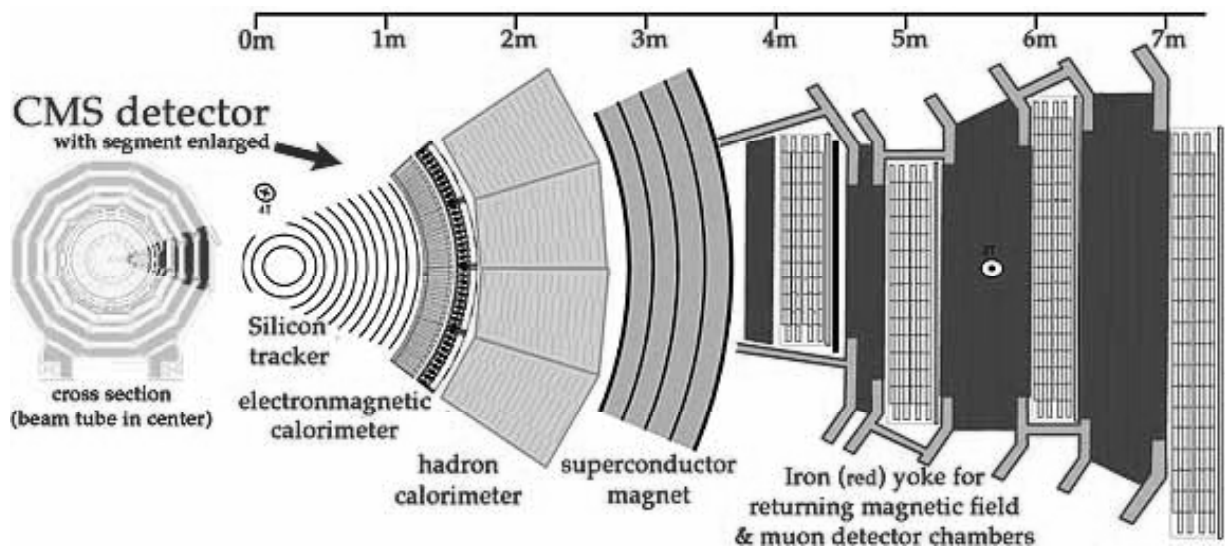


Figure 2 : Les différentes couches phénoménotecniques de CMS.

La conception et la réalisation d'un détecteur pareil est en soi un complexe processus de concrétisation. CMS s'inscrit dans la lignée technique dont les maillons précédents était le détecteur UA1 installé dans le SPS et le solénoïde CDF actuellement en service au Tevatron. L'équipe qui a assuré sa conception et supervisée son installation est en partie issue de celle

qui travaillait sur UA1. La même remarque vaudrait pour ATLAS et le détecteur UA2. Les physiciens expérimentateurs ont développé plusieurs traditions de conception instrumentale distinctes qui tendent à des stratégies d'observation complémentaires : quelles que soient les observations d'un détecteur, il faudra les compléter par celles de l'autre pour qu'elles soient probantes, mais chacun d'eux sera plus efficace pour détecter certains phénomènes.

La notion d'observation intervient donc au LHC en aval et non en amont du traitement de l'information. Elle est particulièrement contre-intuitive par rapport à ce que l'on entend d'ordinaire par ce terme. On présente souvent la construction du LHC comme motivée par le souhait « d'observer le boson de Higgs », qui est la clef de voûte du modèle standard de la physique des particules. Pourtant, il sera tout à fait impossible de faire interagir ce boson avec les détecteurs : étant très instable, cette particule se désintègre en un temps infiniment bref. Ce qui sera éventuellement détecté ce sont les traces des interactions des capteurs avec certaines des particules élémentaires résultant de sa désintégration. Là où l'affaire se complique c'est qu'on ignore la masse du Higgs et par conséquent quel type de particules il s'agit de guetter. Grâce au traitement informatique des données recueillis dans les différents détecteurs, il sera possible de calculer les trajectoires de certaines des particules émises. Mais, dans le tracé embrouillé de ces foisonnantes trajectoires, certaines particules n'apparaîtront pas, car elles interagissent trop peu avec la matière : il faudra donc aussi inférer leur existence à partir du bilan énergétique et de la trace de bifurcations qui impliquent leur émission.

Non seulement l'observation du Higgs est indirecte, mais elle ne sera prouvée qu'au terme d'une très longue évaluation statistique : il ne suffira pas d'une observation pour voir le boson, et ce n'est que rétrospectivement que les physiciens pourront exhiber l'image de la « première » détection. C'est pourquoi, en plus de l'énergie transmise aux protons, la seconde grandeur qui caractérise les performances du LHC est la « luminosité », à savoir la grandeur qui, multipliée par la section efficace, donne le taux d'interaction. On pourrait dire qu'elle mesure la densité des protons qui se conjugue à la précision avec laquelle ils se rentrent dedans. Plus la luminosité sera grande, plus rapide sera l'accumulation des données. Le LHC génère jusqu'à six cents millions de collisions par seconde. Pour traiter ces événements, les ordinateurs du CERN sélectionnent les 10% les plus susceptibles d'apporter les informations recherchées, soit l'équivalent de vingt millions de disques durs par an. Le travail de traitement est ensuite réparti grâce à un nouveau réseau informatique : la « grille de calcul » ou GRID, un ensemble de centres de calcul hiérarchisé en trois niveaux, qui permettra de distribuer l'information aux 70000 ordinateurs des laboratoires associés de par le monde. Le processus d'observation s'étend ainsi du cœur des détecteurs jusqu'aux quatre coins du monde.

Le dernier des accélérateurs au monde.

La mécanologie *génétique* de Simondon analyse les processus de concrétisation des objets techniques au sein de « lignées techniques ». Il y a non seulement une cohérence synchronique au niveau de la technicité entre toutes les machines associées au LHC, mais aussi une solidarité diachronique avec les accélérateurs antérieures à travers la succession des stades de concrétisation. Les lignées techniques alternent les améliorations graduelles avec les reconfigurations globales. L'hypothèse est que cette évolution obéit à un rythme distinctif et qu'il est formulable mathématiquement, par une « loi », à condition de s'entendre sur le sens de celle-ci : elle décrit le rythme probable d'un processus et non la nature de l'événement. De plus, si on étudie le comportement de ce processus comme s'il était objectif et indépendant on risque de prendre pour une prévision ce qui est de l'ordre de la prospective, où la prise en compte de l'évaluation devient elle-même un paramètre.

Selon Simondon, il existe au sein de la succession historique des dispositifs techniques un rythme « qui détermine par sa loi d'évolution en dents de scie les grandes époques de la vie technique. Un tel rythme de relaxation ne trouve son correspondant nulle part ailleurs ; le monde humain pas plus que le monde géographique ne peuvent produire d'oscillations de relaxation, avec des accès successifs, des jaillissements de structures nouvelles »¹⁰. Mais, dans le cas que nous allons considérer, cette loi ne s'applique pas tant à chaque lignée technique qu'à la succession de plusieurs lignées. Elle décrit un phénomène de *substitution après saturation*, tel que le décrit Smaïl Aït-el-Hadj¹¹. Quand on se réfère à une loi d'évolution des systèmes techniques, il faut toujours préciser l'échelle d'application : elle intervient ici au niveau de la lignée technologique des accélérateurs de protons. À la succession des phases d'amélioration graduelle et des phases de reconfiguration globale au sein de chaque lignée techniques correspond, à cette autre échelle, l'évolution jusqu'à saturation d'une génération d'accélérateur, puis, son remplacement par une autre lignée technique.

¹⁰ SIMONDON, 1989, p. 67.

¹¹ Smaïl AÏT-EL-HADJ, *Systèmes technologiques et innovation*, Paris, L'Harmattan, 2002, p. 148.

Les lignées technologiques progressent donc en alternant aussi les phases de progrès mineurs et continus et les progrès majeurs et discontinus selon un rythme de relaxation. Une application prometteuse de la mécanologie génétique consiste alors à examiner l'histoire des lignées technologiques pour déterminer leur rythme distinctif d'évolution. C'est en particulier ce qu'il convient de faire avec la lignée des accélérateurs de protons qui aboutit au LHC. L'évolution saccadée de l'évolution des performances des accélérateurs de particules a été souligné en son temps par Stanley Livingston¹², qui l'a représenté sous forme de diagrammes.

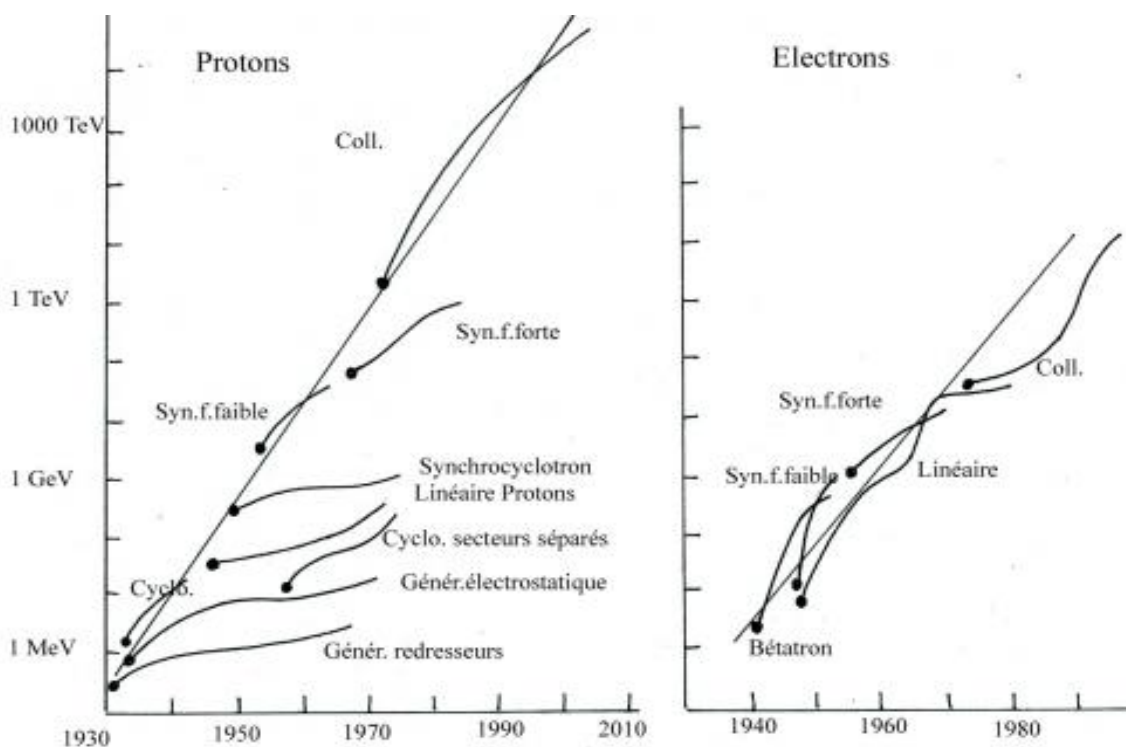


Figure 3 : Les disgrammes de Livingston sur les lignées d'accélérateurs (hypothèse d'une loi logarithmique).

Le décalage temporel entre les deux lignées, celle des accélérateurs de protons et celle des accélérateurs d'électrons, s'explique par le fait que les premiers ont plutôt une vocation exploratoire (atteindre les plus hautes énergies possibles afin de détecter la trace de nouvelles particules), tandis que la fonction des accélérateurs d'électrons est plus métronomique : ils produisent en masse ces nouvelles particules pour en préciser les caractéristiques. Les protons sont plus massifs, et ont donc plus d'énergie de masse à convertir lors des collisions, mais

¹² Stanley LIVINGSTON, *High-energy accelerators*, New York, Interscience Publishers, 1954.

comme leurs quarks se répartissent de manière aléatoire cette énergie au moment de la collision, il est impossible de prévoir *a priori* le bilan énergétique des collisions et la kyrielle de particules qui en découle. Ce qui rend délicates l'identification et la caractérisation des particules. Les électrons, plus légers, sont des particules élémentaires : avec eux, on connaît exactement l'énergie des faisceaux qui entrent en collision. Mais, en tournant, les électrons perdent de l'énergie par rayonnement synchrotron au point qu'ils finissent par perdre durant leur trajet autant d'énergie que l'on est en mesure de leur conférer. Comme la puissance des aimants pour les protons, le rayonnement synchrotron est un facteur limitant pour l'électron qui implique d'augmenter la taille de l'accélérateur pour repousser le point de saturation. Les accélérateurs de protons comme d'électrons évoluent donc vers le gigantisme.

La lignée des accélérateurs de protons possède comme origine le premier cyclotron, un objet « abstrait », encore peu synergique : « le premier cyclotron, qui ne mesurait pas plus de deux pieds, était un assemblage de matériaux que l'on pouvait trouver traînant dans n'importe quel laboratoire de physique : des panneaux de verre, des morceaux de bronze, et de la cire »¹³. Les paliers franchis dans la puissance par ces accélérateurs correspondent, par la suite, à des processus de concrétisation repérable, avec réorganisation du dispositif et accès à un nouveau palier d'évolution graduelle. Chaque progrès donne ainsi naissance à une nouvelle branche de la famille des accélérateurs. Le seuil franchi par le LHC est tel que les précédentes générations d'accélérateurs collaborent à son fonctionnement comme des étapes préparatoires dans un réseau qui l'approvisionne en protons accélérés. Produits par ionisation d'atomes hydrogènes, puis propulsé par un accélérateur linéaire (LINAC), les protons circulent ensuite dans une série de synchrotrons, qui les accélèrent progressivement : le synchrotron injecteur du synchrotron à protons (PSB), puis le synchrotron à proton (PS), et le super-synchrotron à proton (SPS). Ce processus de concrétisation s'accompagne, en outre, d'une concentration des moyens : on passe d'une situation où chaque laboratoire pouvait héberger son accélérateur de poche à la communauté mondiale des physiciens des particules autour du seul LHC.

En ajoutant aux données de Livingston les dates d'apparition de lignées postérieures aux années cinquante et en adoptant une modélisation mathématique plus proche encore que son modèle logarithmique de ce que Simondon décrivait qualitativement comme un rythme de relaxation, Ivan Brissaud et Eric Baron¹⁴ ont modélisé l'évolution des accélérateurs de protons par une équation log-périodique de la forme $(T_n - T_c) = (T^0 - T_c) \times g^{-n}$ avec pour constante $g = 1,37$ et

¹³ BAIRD, 2004, p. 59.

¹⁴ Ivan BRISSAUD et Eric BARON, « La Course des Accélérateurs de Particules vers les Hautes Energies et la Log Périodicité », *Cybergeo*, 11 décembre 2007. URL : <http://www.cybergeo.eu/index14173.html>.

la date de 1930 comme temps critique (comme origine de la lignée technologique). Cette modélisation log-périodique permet de rétro-prédire avec une précision assez satisfaisante les principaux stades de la concrétisation :

Rang de l'événement	Génération technique	Date rétroprédite	Date observée
-1	Radioactivité alpha.		avant 1911
0 (Tc)	Cyclotron	1932	1932
1	Accélérateur linéaire	1946	1946
2	Synchrotron à focalisation faible	1952	1952
3	Synchrotron à focalisation forte	1961	1959
4	Collision « chaud »	1972	1972
5	Aimants cryogéniques	1987	1988
6	Aimants et cavités cryogéniques	2008	2008

L'un des enjeux principaux des résultats obtenus au LHC concerne le prolongement de cette lignée : si le LHC ne découvrait que le boson de Higgs, sans fournir aucune information sur la physique située au-delà du modèle standard, il serait difficile à la communauté scientifique de justifier la construction d'un accélérateur encore plus puissant (encore plus coûteux). Ce scénario du « grand désert » est la hantise des physiciens des particules, car avec l'avenir des grands appareils se joue aussi l'avenir du champ de la physique des particules en tant qu'il n'est pas purement spéculatif. Or, la loi d'évolution de la lignée des accélérateurs de protons, élaborée et mise à l'épreuve à partir de rétroprédictions, permet une prospective qui apporte une réponse ambiguë, car positive mais peu encourageante à court terme : elle prédit un stade ultérieur de concrétisation, mais seulement dans trente ans (2037) ! Il faudra peut-être attendre le renouvellement de toute une génération de physicien, voire un changement de paradigme scientifique, pour qu'un nouveau type d'accélérateur soit mis en service. Certains font déjà leur deuil de l'âge d'or de la physique des particules.¹⁵ Sans exagérer sa validité prédictive, la modélisation log-périodique a le mérite, du point de vue de la mécanologie génétique de reposer sur des critères strictement techniques et non sur les anticipations de la compétition économique¹⁶. Selon cette prospective fondée sur l'autonomie relative du progrès technologique, le LHC restera, assez longtemps, le dernier accélérateur de protons au monde.

¹⁵ Peter WOIT, « The Instruments of Production », in *Not even wrong*, London, Jonathan Cape, 2006 : « Durant la majeure partie du vingtième siècle, la physique des hautes énergies a profité des progrès constants de la technologie qui ont permis une croissance exponentielle durable des énergies accessibles. (...) Malheureusement pour les physiciens des particules, cette période touche à sa fin. À moins d'une révolution technologique inattendue, il n'y a aucune chance que le vingt-et-unième siècle soit en mesure de prolonger la croissance exponentielle. »

¹⁶ Pour une critique de la « loi de Moore », Cf Ikka TUOMI : http://www.firstmonday.org/issues/issue7_11/tuomi/

Une merveille du monde contemporain.

Le LHC n'est pas un objet technique ordinaire. Il a une aura qui n'appartient qu'à lui. Les objets techniques ordinaires, comme les produits industriels, sont comme entourés d'un « halo psychosocial ». Ils sont jaugés en milieu social et culturel en fonction des résonances affectives de ce complexe d'opinions et de motivations. Ce *halo* des objets techniques a cela de particulier qu'il exprime la similarité et la proximité entre les différents objets produits en série, l'ubiquité de la technicité. Acheter ou utiliser un objet technique, c'est aussi adhérer aux valeurs d'une gamme, d'une série ou d'une technologie censées se retrouver en chacun d'eux. Dans le cas du LHC, le sentiment d'appartenance pour ceux qui ont participé à sa construction ou qui continue de travailler à son fonctionnement et son entretien est encore beaucoup plus intense. Il se développe chez ces ingénieurs et ces techniciens une familiarité avec les parties du dispositif dont la responsabilité leur incombe, mais cette relation de participation s'étend à l'ensemble des individus qui font l'expérience de ce halo. Le LHC laisse comme rayonner autour de lui une lumière globale, comme la technicité qui en rend possible le fonctionnement dépasse sa réalité limitée. Son halo se répand sur l'entourage, comme une zone de technicité et non comme une propriété attachée à l'une ou l'autre de ses parties. Car c'est la technicité qui rayonne, c'est elle qui établit la participation. À travers son halo, le LHC est ainsi plus que lui-même : son rayonnement n'est pas contenu dans ses limites objectives, matérielles.

Mais ce sentiment d'appartenance ne concerne que les individus qui ont des relations techniques avec le LHC. La puissance symbolique du LHC ne se résume pas à l'effet de halo, elle s'exprime davantage par l'*aura* singulière du LHC. L'*aura* émane d'ordinaire des œuvres d'art, car elle manifeste une présence unique, l'émerveillement devant *le hic et nunc* : « Qu'est-ce, en somme que l'*aura* ? Une singulière trame de temps et d'espace : apparition unique d'un lointain, si proche soit-il. »¹⁷. Or, le LHC est une de ces réalités uniques qui s'inscrivent à l'horizon de notre monde. Une singularité naturelle ou artificielle qui possède

¹⁷ Walter BENJAMIN, « L'œuvre d'art à l'ère de sa reproduction mécanisée », in *Ecrits Français*, Paris, Gallimard, 1991, p. 144.

une aura est solitaire, séparée des autres réalités par une distance irréductible. Au contraire du halo qui symbolise un ensemble de solidarités et d'équivalences, la communauté des objets techniques, l'aura du LHC manifeste sa singularité, son caractère extraordinaire de prototype par rapport à toutes les autres réalisations technologiques, industrielles, produites en série.

C'est à cette aura que sont sensibles les commentateurs bien qu'ils ne sachent pas toujours en quoi il consiste. Des expressions reviennent sans cesse quand il est question du LHC et de ses détecteurs dans la vulgarisation scientifique. On le compare à un Léviathan, on l'appelle le « seigneur des anneaux », on rappelle que CMS contient plus de métal que la tour Eiffel et qu'Atlas occupe un volume qui remplirait la moitié de Notre-Dame. Le LHC est la « machine de tous les superlatifs »¹⁸. Pourtant ces amplifications rhétoriques peinent à rendre l'émotion que peuvent ressentir ceux qui prennent conscience de son existence et de la somme de travail et d'intelligence qu'il représente. Nul ne doute du caractère extraordinaire et unique de la construction du LHC, mais sont-ce les comparaisons entre la taille de ses détecteurs et la nef de Notre-Dame ou entre la masse de métal utilisé et le poids de la tour Eiffel, qui nous permettent de comprendre en quoi il s'agit d'une réalisation technologique majeure ? Le LHC possède bien une aura comme ces témoignages du génie des siècles passés, mais celle-ci n'émane pas de la stupeur que provoque rétrospectivement l'ampleur de son chantier, ni de la conversion esthétique de notre regard qui en ferait l'équivalent des monuments du passé. D'autres projets industriels consomment autant de moyens et d'énergie, et il y aurait peu de sens à ce que le LHC soit conservé des siècles durant, même comme un témoignage de la foi en le progrès. Son aura n'est pas lié à ses dimensions spatiales ou à sa durée, mais à sa singularité en tant que technologie et en tant que rapport inédit au monde. Le LHC est une réalisation *majeure* de la technologie parce qu'il pousse à leurs limites les possibilités technologiques de notre temps. Son aura est celui de la plus haute technicité.

Il est surtout celui de la *technicité pure*. L'investissement dans les grands appareils phénoménotecniques est « désintéressé » au sens économique du terme : la technicité du LHC vaut par l'approfondissement de notre connaissance de la nature. Les journalistes insistent sur la compétition entre ce projet européen et le Tevatron américain, alors que des physiciens de toutes nationalités collaborent aux deux en même temps. Ces grands appareils producteurs de connaissance universelle dépassent les rivalités géopolitiques : nulle autre collaboration technologique n'opère de façon si œcuménique que l'Iran et Israël y soit impliqués ensembles. C'est en ce sens, une merveille du monde contemporain.

¹⁸ Graham COLLINS, « The Discovery Machine », *Scientific American*, 298: 2, février 2008.

Pour une épistémologie de l'expérimentation scientifique.

Davis Baird a proposé six différences entre une épistémologie ordinaire, aux objets purement théoriques, et une épistémologie des instruments scientifiques, qui prend en compte leur matérialité.

La première est que « l'on peut imaginer une vis parfaite, mais on ne peut pas faire une vis parfaite »¹⁹. Manière de dire qu'il y a loin de la conception à la réalisation, ce qui vaut la peine d'être rappelé mais risque néanmoins d'induire l'idée fautive d'une imperfection de principe de la réalité matérielle par rapport à l'idée : le LHC est justement un dispositif technologique qui ne peut pas se permettre la moindre imperfection. Par exemple, le faisceau de protons doit circuler dans l'ultravide, pas dans un vide à peu près.

La seconde est qu'un instrument prend de la place : l'encombrement importe lors de son installation ou de sa circulation. L'encombrement est un paramètre important des problèmes de conception et d'assemblage du LHC. La mise en place des massifs éléments des détecteurs fut une opération spectaculaire : le déplacement des immenses « roues » d'Atlas ou de CMS a représenté un défi technique. Avant cela, l'emplacement était déjà une décision stratégique de première importance : le LHC est implanté dans le site où se trouvait le LEP2, un accélérateur d'électrons qu'il a fallu mettre hors service et démonter. La construction du Superconducting Super Collider (SSC) supposait au contraire de creuser un nouveau tunnel circulaire de quatre vingt sept kilomètres au Texas. L'échec de ce projet tient à l'explosion des coûts de ce « grand trou dans le désert ». Mais l'insertion du dispositif technologique au sein du monde prend davantage de sens quand on la pense en termes de médiations entre les échelles plutôt que comme rivalité géopolitique ou résistance des matériaux géologiques.

La troisième tient à l'imprévisibilité du comportement selon les matériaux employés. L'ultra-technicité du LHC tend à évacuer cette question ou, plutôt, à la reformuler en termes de contraintes matérielles : ses aimants supraconducteurs, par exemple, ne sauraient être

¹⁹ BAIRD, 2004, p. 152.

construits dans une autre matière. Plutôt que la contingence des matériaux, il est préférable d'analyser le rapport des matériaux aux exigences théoriques et l'artificialisation du milieu.

La quatrième différence concerne la circulation et la localisation des instruments qui déploie un réseau de connaissances autour d'eux, alors que les idées seraient non locales. Le LHC ne circule pas, mais il est indéniable qu'un réseau se met en place autour de lui. Les trajectoires des physiciens des particules sont modifiées par sa localisation dans le temps et dans l'espace : au fur et à mesure que sa mise en service approche, les théoriciens s'attachent à mettre en avant la testabilité de leurs modèles et les expérimentateurs convergent vers le CERN pour être aux premières loges.

La cinquième est que la sécurité et l'ergonomie ne sont pas négligeables. Les aimants supraconducteurs sont refroidis à une température proche du zéro absolu pour fonctionner, ce qui implique un circuit gigantesque de refroidissement à base de liquides cryogéniques, dont de l'hélium liquide. L'hélium n'est pas un gaz toxique, mais les risques d'anoxie (quand l'oxygène est chassé par un autre gaz) sont réels en cas de fuite. C'est pourquoi lors de la visite du tunnel, nous avons été équipés, comme tous les techniciens et visiteurs, d'un système autonome de respiration. La recherche de l'ergonomie est manifeste dans la configuration du centre de contrôle du CERN, que l'on peut comparer aux salles de contrôle des aiguilleurs du ciel : toutes les informations sur la cryogénisation et la circulation des faisceaux convergent en ce lieu afin qu'une anomalie en un point quelconque soit immédiatement corrigée et pris en compte dans le reste de la chaîne de commande.

Les cinq premières différences suggèrent plusieurs pistes intéressantes pour prolonger et approfondir nos analyses de certains aspects de l'être-au-monde du LHC. Mais c'est la dernière, le fait que la connaissance du fonctionnement interne des instruments scientifiques n'est pas indifférente à la compréhension de l'activité des scientifiques, qui rejoint la méthode mécanologique de Simondon. Baird a raison de relever que, paradoxalement, « l'opacification comme boîte noire rend le matériel transparent »²⁰. Pour bien faire, une analyse du LHC devrait approfondir les aperçus que nous avons donnés. Elle devrait, par exemple, détailler l'ensemble des niveaux d'organisation du LHC ou, au moins, décrire toute une chaîne de transmission de l'information, depuis la détection des particules jusqu'aux transductions électroniques des ordinateurs. Mais, en l'état, nous espérons que notre éloge invitera les amateurs de science comme les philosophes des sciences à porter davantage d'attention aux conditions technologiques du progrès scientifique.

²⁰ BAIRD, 2004, p. 165.