

Le monopôle magnétique n'est plus un mythe ! Il a une équation, des expériences et il prévoit des applications.

Georges Lochak

Fondation Louis de Broglie 23, rue Marsoulan 75012 Paris

e-mail : inst.louisdebroglie@free.fr

Résumé : Le monopôle magnétique est une particule portant une seule charge magnétique nord ou sud, et non pas deux charges opposées comme un aimant. Il passe souvent pour un mythe, mais en réalité, il existe aujourd'hui une théorie, due à l'auteur de ces lignes, avec des équations et des prédictions précises soutenues par des centaines d'expériences d'où résultent des applications possibles à différents domaines, comme des énergies non polluantes, la médecine et même la conquête spatiale. Mais ce monopôle n'est pas celui qu'on attendait. On l'attendait lourd, et il est léger ; on attendait —excusez ces barbarismes! — « un boson doué d'interactions fortes », alors que c'est « un fermion doué d'interactions faibles ». Mais la théorie s'accorde avec l'expérience, nous le montrerons en termes simples.

La science est tissée d'interminables controverses, de heurts entre conceptions opposées qui finissent parfois par s'unir, d'oublis définitifs et de résurgences triomphantes : le monopôle magnétique ne fait pas exception. A l'heure où sont écrites ces lignes, au mot « monopôle » sur Google, on dit « qu'on ne l'a jamais observé », mais au mot « Lochak monopôle » on cite des articles qui énoncent une autre théorie, et décrivent des expériences d'où pointent des applications à la recherche d'énergies nouvelles, à la médecine et même, en filigrane (sous couvert de relativité), à la conquête de l'espace. Mais avant d'aller plus loin, voici une page préliminaire.

1) Quelques rappels d'histoire qui éclairent la suite.

Sans remonter jusqu'aux Grecs, au début du XIX^e siècle, la chimie pour Dalton, c'était l'atome ; la chaleur pour Carnot, c'était l'atome. A la fin du siècle, chimistes et physiciens n'en voulaient plus: « Un sabbat de sorcières » dit l'un d'eux. Mais les atomes triomphèrent et envahirent la physique du XX^e siècle.

La lumière vit une semblable alternance. Pour Huygens, la lumière c'était des ondes. Pour Newton c'était plutôt des particules mais sans oublier les ondes : il était un précurseur du dualisme. Ce sont ses successeurs qui bannirent les ondes, mais celles-ci revinrent avec Fresnel et Maxwell et cette fois ce sont les particules qui furent bannies : encore une fois par la faute des épigones car Fresnel mettait ses espoirs dans l'atomisme dont Maxwell fut plus tard l'un des fondateurs, avant de découvrir la théorie électromagnétique de la lumière.

Enfin, en 1905, les particules revinrent avec Einstein, qui fit scandale avec le photon, particule de lumière que personne n'attendait. Mais, avec Louis de Broglie, les ondes s'unirent aux particules dans la lumière comme dans la matière et elles sont ensemble à la bases des théories quantiques.

Le monopôle magnétique connaît les mêmes balancements : il fut le rêve de quelques-uns, nié par beaucoup et l'objet de toute une littérature. Dès le XVIII^e siècle, **Coulomb** y pensait ; sans avoir pu l'observer, il détermina par un artifice sa force magnétique et trouva la même loi en $1/r^2$ qu'il avait trouvée pour l'électricité et que Newton avait mise à la base de la gravitation. Au XIX^e siècle, **Maxwell** qui, lui non plus, n'a pas vu le monopôle, le mit à la base du magnétisme. Et surtout, il comprit que *la force magnétique n'a pas la symétrie d'une flèche, comme la force électrique, mais celle d'un tire-bouchon*. En 1894, **Pierre Curie**, décrivit les lois générales de la symétrie de l'électricité et du magnétisme, et le rôle capital de la *chiralité* (du grec *keir* : *main*), qui distingue la gauche de la droite. La *chiralité* avait été l'une des plus grandes découvertes de **Pasteur** qui montra qu'elle est le propre de la vie et que — le mot est de lui — « *L'univers n'est pas égal à son image dans un miroir* ».

Pierre Curie a décrit « *le magnétisme libre* », donc le monopôle, et a prédit qu'il devait être *chiral*. Nous verrons qu'on l'a confirmé théoriquement et prouvé par l'expérience. Mais on savait déjà, depuis 1956, grâce à **Lee et Yang et à Mme Wu**, que la *radioactivité bêta* et toutes les *interactions faibles* sont chirales : c'est la *non conservation de la parité*. Il s'ensuit que le *neutrino*, une importante particule qui leur est liée, est chiral lui aussi : gauche ou droit.

En cette même année 1956, je travaillais chez Louis de Broglie sur *l'électron de Dirac* et j'ai trouvé deux formules simples, mais incompréhensibles à l'époque. Tout en faisant bien d'autres choses, j'y ai réfléchi pendant 25 ans, j'ai fini par comprendre que ces formules étaient liées à Lee et Yang et j'ai trouvé une *équation*, analogue à celle de Dirac, *qui représente non plus un électron mais un monopôle magnétique*, lequel est, en quelque sorte, l'autre versant de l'électron. Les lois de Pierre Curie en découlent aussitôt. Cette équation redonne comme *cas limite classique* une équation de Poincaré, datant de l'époque héroïque de l'électron (en inversant l'électricité et le magnétisme).

D'autre part, on connaissait, depuis 1931, une formule due à Dirac, (sans rapport avec son équation) qui montre que la charge d'un monopôle magnétique est égale à un multiple entier de la charge de l'électron multipliée par 68,5 : mon équation retrouve ce résultat sous une forme plus précise et elle montre, que si le multiple est égal à zéro, donc si le monopôle n'a pas de charge et est neutre, *mes équations se simplifient et coïncident exactement avec celles du neutrino*.

Ce monopôle magnétique est une forme excitée du neutrino, d'où l'hypothèse qu'il doit être doué comme lui d'interactions faibles, ce que l'expérience a confirmé.

2) Mais pourquoi n'avait-on pas vu plus tôt le monopôle magnétique ?

On ne l'a pas vu parce qu'on ne le cherchait pas où il était. C'est le problème de la clé de voiture et du réverbère ! Comme on n'avait pas d'équation prévoyant des propriétés physiques précises, on s'est engagé sur une voie dont on ne sait pas encore si elle mène quelque part. On cherchait un monopôle lourd, ce qui expliquait qu'il soit difficile à produire, alors que le mien est sans masse au repos et n'a qu'une énergie de mouvement, ou provenant des champs qui agissent sur lui. On cherchait un « boson », alors que le mien est un « fermion » (je ne saurais en dire plus ici). Enfin, on cherchait des « interactions fortes », comme les forces nucléaires, alors que mon monopôle a des « interactions faibles », comme celles de la radioactivité bêta, ce que l'expérience a confirmé. J'étais donc mal reçu, quand vint une rencontre, d'un autre horizon, scientifique et géographique.

3) Un coup de téléphone de Moscou.

Je parle couramment le russe et je reçus un jour, de Moscou, un coup de téléphone d'un physicien que je ne connaissais pas, **Léonid Urutskoïev** de l'Institut Kurtchatov, de retour d'une longue mission à Tchernobyl, à la tête d'une équipe qui cherchait l'origine de la catastrophe.

Après dix ans d'observations trop longues à rapporter ici, il avait émis l'hypothèse *d'un flot de monopôles*, provenant d'une explosion électrique (qui s'est produite dans la salle des machines). Le flot se serait propagé par le circuit de refroidissement du réacteur, déclenchant l'accélération du processus nucléaire alors qu'il était en train de s'éteindre pour changer les barres d'uranium.

Urutskoïev me dit d'emblée qu'il pensait qu'il s'agissait de « mon » monopôle, en s'appuyant sur une série de phénomènes étonnants, à commencer par l'emballement des désintégrations ; mais il y eut aussi l'attraction violente d'une conduite électrique vers le circuit de refroidissement, d'où vint l'idée du magnétisme ; un enrichissement extraordinaire des débris d'uranium, allant jusqu'à 27% d'uranium 235 (!), alors que les barres n'étaient plus qu'à 1,1% ; le soulèvement et le basculement sur le côté du couvercle du réacteur pesant 2500 tonnes, alors que les parois (même internes) étaient restées *intactes*, ce qui excluait une pression gazeuse et fit chercher d'autres causes, y compris un changement possible du champ de gravitation ; il y eut encore une éblouissante clarté qui n'était pas due à un incendie du réacteur, car la peinture interne et le graphite étaient intacts (sauf à un endroit).

Tout cela appelait des causes très inhabituelles et certains indices firent pencher Urutskoiev vers l'hypothèse audacieuse d'un *monopôle magnétique léger*.

Le coup de téléphone d'Urutskoiev fut le début de dix années de travail commun ponctuées d'allers et retours et d'innombrables e-mails et conversations téléphoniques. Des dizaines de physiciens y furent engagés, ou y contribuèrent parallèlement. A Moscou : à l'Institut Kurtchatov, à l'Institut de Physique générale de l'Académie, à l'Université d'Etat et d'autres ; à l'Institut Unifié de Recherches Nucléaires de Doubna ; aux Universités de Kazan et de Kiev ; en France : à l'Ecole Centrale de Nantes ; et une collaboration plus ponctuelle, en Allemagne, à Karlsruhe.

Les expériences se comptèrent par centaines, les publications théoriques et expérimentales par dizaines. Le principal centre théorique fut la Fondation Louis de Broglie.

4) Les expériences et les observations.

a) Les sources de monopôles sont de deux sortes :

- La première est une discontinuité d'un courant électrique : une forte décharge, un arc, ou des étincelles plus ou moins importantes. Ces sources furent seules utilisées, mais il en est une autre :
- Nous verrons que le monopôle étant un neutrino magnétiquement excité, *un champ magnétique peut transformer en monopôles une partie des neutrinos émis par un corps bêta radioactif*. C'est une source possible n'émettant qu'un petit nombre de monopôles, ce qui peut être intéressant quand les autres sources en émettent un grand nombre.

b) Les traces. Les monopôles laissent des traces particulières très reconnaissables sur les émulsions photographiques (Fig.1) ; elles montrent la présence des monopôles et révèlent certaines de leurs propriétés :

- Les traces se muent en « comètes » dans un champ magnétique (Fig.2).
- Elles sont déviées par un champ électrique, comme l'est un électron par un champ magnétique.
- Une bobine magnétique focalise le faisceau de monopôles. Même un simple aimant le dévie.
- **Une expédition de Jean-Louis Etienne a rapporté du pôle Nord des pellicules porteuses de traces de monopôles, confirmant l'hypothèse que j'avais émise, que si les monopôles sont des états excités des neutrinos, il est possible qu'une partie des neutrinos solaires se transforment en monopôles sous l'effet des champs magnétiques locaux. J'avais proposé cette observation en prévoyant que des monopôles émis par le soleil et orientés vers la terre suivraient les lignes du champ magnétique terrestre, ce qui fut confirmé.** (Fig.3)
- **La chiralité** prévue par la théorie et observée par Ivoilov (Fig.4). Le germanium est un miroir à monopôles. Or les pellicules X, utilisées pour l'observation, sont sensibles sur leurs deux faces et l'on vérifie au microscope que l'image directe et l'image réfléchie ne s'impriment pas sur la même face. **Mais, elles sont égales comme le prévoient les « pseudo - images » chirales**, et non pas inversées comme une image optique, mais elles sont tournées à 180° dans le plan de la pellicule conformément aux lois de symétrie (voir Fig. 3 et, à titre d'illustration, un tableau de Magritte)

c) Une brillante preuve du magnétisme. Un échantillon de Fer 57 est irradié par des monopôles d'un seul signe, triés par un simple pôle d'aimant. L'effet Mössbauer permet alors de mesurer *le petit déplacement spectral* qui en résulte pour une certaine raie optique. *Si l'on recommence en changeant le pôle d'aimant, le déplacement va dans le sens contraire.*

d) Le temps de vie du monopôle. Après quelque jours, les déplacements spectraux en question disparaissent, ce qui indique un temps de vie de l'état excité du neutrino, de l'ordre de quelques jours : on l'a confirmé dans d'autres cas. **Mais il ne s'agit là que des effets magnétiques du monopôle comme état excité du neutrino, et non des effets « matériels », comme les traces ou les effets nucléaires, chimiques et biologiques dont voici des exemples :**

A) Les transmutations nucléaires (celles qui ont principalement occupé Urutskoiev et son groupe). Les monopôles modifient le mélange isotopique des éléments irradiés et il apparaît des éléments du tableau de Mendeleiev absents de l'état initial.

B) La radioactivité bêta. Elle émet un électron et un antineutrino ou un positron et un neutrino. Nous avons vu qu'un champ magnétique peut transformer en monopôles une partie de ces neutrinos,

d'où les observations au Pôle Nord. C'était déjà connu en laboratoire : **un échantillon radioactif bêta émet des monopôles dans un champ magnétique.**

C) **La radioactivité bêta inverse** consiste en ce qu'un échantillon radioactif β^- ou β^+ , donc émettant des électrons ou des positrons, s'excite sous l'effet de neutrinos, dans le premier cas, ou d'antineutrinos dans le second (l'absorption de l'un équivalant à l'émission de l'autre). Or les monopôles font de même : **le temps de vie d'un échantillon bêta est modifié sous l'action des monopôles.** Ce qui prouve l'action de ceux-ci sur les interactions faibles.

D) **L'enrichissement des débris d'uranium** à Tchernobyl avait attiré l'attention d'Urutskoiev, **qui a confirmé en laboratoire que c'est bien un effet des monopôles.**

E) **Effets biologiques.** Invité par Urutskoiev, un biologiste venu de l'Oural, **Pryakhine**, a fait un grand nombre d'expériences sur des souris. Il montra notamment que **l'irradiation par des monopôles augmente la production de moelle osseuse.** D'où l'espoir de développer ces recherches en vue d'applications médicales possibles.

5) Une parenthèse un peu plus difficile : quelques mots sur la théorie.

La théorie part d'une idée simple qui n'est pas universelle, mais qui a fait ses preuves en mécanique quantique : les **groupes d'invariance**. Prenons l'exemple d'un vase cylindrique posé sur une table. Il a une symétrie de révolution et **ne change pas s'il tourne autour de son axe**¹. S'il tourne de deux angles successifs, tout se passe comme s'il avait tourné une seule fois de la somme des deux angles. S'il tourne d'un angle, puis de l'angle inverse, il retrouve sa première position, comme s'il n'avait pas tourné du tout. On dit que ces rotations forment un groupe d'invariance pour le vase.

Le vase sur la table a d'autres groupes d'invariance, comme le fait de glisser d'une certaine distance dans une certaine direction : ces mouvements aussi s'ajoutent et se retranchent, d'une façon un peu plus compliquée.

Les mathématiques ne sont jamais aussi belles que lorsqu'elles rendent fécondes des idées simples² : car les équations de la physique font de même ! Elles ont des groupes d'invariance qui sont des transformations algébriques qui conservent la forme des équations et révèlent des propriétés physiques. Ainsi, l'équation de Dirac possède une *invariance de jauge* qui change un peu l'onde décrite par l'équation (elle change sa « phase »). Mais si, en plus, cette loi *s'applique différemment dans l'espace et le temps*, selon le point et l'instant, on trouve que la particule ainsi décrite possède une **charge électrique : c'est un électron.**

Or, si la particule décrite par l'équation n'a pas de masse (un peu comme la lumière), elle acquière une *seconde invariance de jauge*, et est la seule autre possible. Mon idée de départ fut simple : j'ai supposé que, là aussi, *cette loi d'invariance pouvait changer d'un point et d'un instant à un autre*. Et il arrive un miracle : la nouvelle particule interagit avec l'électromagnétisme d'une autre manière, elle a une charge non plus électrique mais **magnétique** : c'est le **monopôle** dont nous parlons. Elle obéit aux lois de Maxwell et de Pierre Curie, qui ne résultent plus d'une série d'analyses mais d'une seule hypothèse qui est cette seconde invariance de jauge, d'où une **nouvelle équation**.

Cela étant, je n'ai pas trouvé « le » monopôle, mais seulement « l'un des » monopôles possibles : l'état excité du **neutrino associé à l'électron**. Or ce dernier appartient à la famille des **leptons**, qui sont trois : **l'électron**, le **muon** et le **lepton tau**, auxquels sont associés **trois neutrinos différents**. Il manque donc, au moins les deux monopôles associés aux neutrinos mu et tau. Mais il en manque sûrement davantage car il doit exister un monde magnétique, comme il existe un monde électrique, et il est juste entrevu

¹ Une remarque amusante de Dirac : si le vase est parfaitement lisse et de révolution, on ne voit pas qu'il tourne ; pour le voir, il faut faire une petite marque, mais alors le vase n'est plus de révolution (tant pis, nous continuons !...).

6) Regard sur les applications.

Les *monopôles leptoniques*, comme nous les appelons, sont des particules différentes de celles découvertes depuis l'après guerre, qui étaient des particules lourdes généralement douées d'interactions fortes (les interactions nucléaires). Elles entrent dans notre image du monde mais sans effets pratiques : on ne voit leurs effets que dans les appareils faits pour les observer. Au contraire, les monopôles leptoniques étant non seulement magnétiques mais doués d'*interactions faibles*, ils peuvent intervenir dans des phénomènes directement accessibles.

Citons d'abord deux ouvertures prometteuses mais qui ne sont encore qu'entrouvertes :

- a) Les applications médicales auxquelles j'ai fait allusion.
- b) Une aide au décollage des fusées sous l'effet des monopôles (c'est encore hypothétique et trop long à raconter).

Les conséquences jusqu'ici les plus importantes sont les **phénomènes nucléaires**, d'une façon étonnamment pacifique. La raison en est que les interactions fortes produisent de l'énergie mais ce sont les interactions faibles qui les organisent : ainsi l'énergie solaire est commandée par le cycle de Bethe – Weitzsäcker, qui nous envoie les neutrinos qu'on a trouvés au pôle nord sous forme de monopôles. On a pu dire que « sans interactions faibles, il n'y aurait pas d'énergie solaire ».

Or, le magnétisme des monopôles nous donne les moyens de guider leur action et d'en faire un vecteur d'interaction faible qui nous permet d'agir sur les interactions fortes. C'est l'un des nœuds des recherches expérimentales d'Urutskoiev dont voici quelques conséquences possibles :

- 1) La destruction des déchets nucléaires par leur désintégration.
- 2) Mais il y a mieux : on étudie un projet de réacteur nucléaire fondé non sur des éléments lourds mais sur des éléments légers du tableau de Mendeleiev comme le fer (plus abondant que l'uranium !). Un tel réacteur serait **sans déchets radioactifs**. Seule ombre au tableau : ces recherches ne s'effectuent qu'à Moscou et il serait temps qu'on les entreprenne en France.
- 3) Les transmutations nucléaires induites par les monopôles produisent une énorme quantité d'hydrogène d'origine nucléaire, qu'on envisage de récupérer pour l'automobile avec pour seule pollution... de la vapeur d'eau ! Là aussi il serait temps que la France s'y mette.
- 4) Citons cependant un succès français : on a inventé et réalisé à Paris le premier **accélérateur de monopôles**, qui pourra à la fois les focaliser et augmenter leur énergie. Sans aucune aide officielle, l'appareil a été construit par des moyens de fortune dans la cave de la Fondation Louis de Broglie. Il est vrai qu'il est petit : quelques mètres (il faut rappeler que le premier cyclotron tenait dans la main !). L'accélérateur est encore en pièces détachées car il lui faut un lieu protégé contre les radiations. N'étant accueillis par aucun organisme officiel, nous nous sommes tournés vers l'industrie privée qui a fait preuve de courage et d'attraction vers la nouveauté. C'est une très puissante industrie française et européenne qui nous offre son aide et sa contribution scientifique et technique. Qu'elle en soit ici chaleureusement remerciée.

Mais tout cela n'est pas magique. Tout n'est pas sûr. Ce n'est que le début d'une aventure scientifique et technique qui exigera les efforts de puissants laboratoires animés par le goût du risque et la volonté de réussir. Je me permets d'y appeler, ayant moi-même produit 25 ans de calculs presque solitaires avant d'avoir assez d'effets à prévoir, à décrire et à expliquer. J'y suis parvenu grâce à deux éminents partenaires et amis auxquels je veux rendre hommage : **Léonid Urutskoiev** dont j'ai parlé et **Harald Stumpf** qui fut mon homologue auprès de **Heisenberg**, dont il fut successivement l'élève, le collaborateur et l'ami, exactement comme je le fus pour **Louis de Broglie**. Nous disons plaisamment que nous sommes la queue de la grande comète !

Ces efforts doivent nous encourager à protéger, à défendre et à faire prospérer la science, à une époque où elle est attaquée de toutes parts, comme une mère que l'on renie, alors qu'elle seule peut nourrir un monde qui a faim et produire de véritables énergies propres, capables de faire marcher le monde moderne et pas seulement d'enlaidir les paysages en vivant aux crochets de l'Etat. Seule la science, par ses progrès et ses applications, protégera notre vie et notre environnement.

Du même auteur :

- *Louis de Broglie un prince de la science*, Flammarion – Champs, Paris, 1992.
- *Défense et illustration de la science. Le savant la science et l'ombre*, Ellipses, Paris 2002.
- *Voyage au centre de la science au XX^e siècle*, Hermann, Paris, 2008.