

SOME ASPECTS  
OF THE  
SCIENTIFIC BACKGROUND TO TELECOMMUNICATIONS

---

Summary of the Lecture given by Sir Kariamanikkam S. Krishnan, Kt., D.Sc., LL.D., F.R.S., Director, National Physical Laboratory of India and National Professor, on the occasion of the International Telecommunication Union banquet, Hotel des Bergues, Geneva, Switzerland, Saturday, 21 November, 1959

I deeply appreciate the honour of being invited to be the Guest Speaker at the Banquet of the International Telecommunication Union. I wish to convey my very sincere thanks to the organizers for this invitation. That a mere physicist could find a place in the orbit of the telecommunication engineers might be of scientific significance; it illustrates a certain close interdependence between contiguous disciplines, which has long been recognized as a characteristic and very refreshing feature of all scientific progress. At any rate this interdependence has become a great tradition in the history of telecommunications, which is our major interest in this Conference. I shall have occasion later to dwell at some length on this close collaboration between the different scientific disciplines, and in particular *engineering and the physical sciences,* between the ~~scientist and the engineer~~, which has proved so fruitful in the development of telecommunications.

The presence here of distinguished delegates from many different parts of the world reminds me also of the wide international scientific cooperation, in the establishment of which you took the lead. Most of you will be familiar with the International Geophysical Year programme which was organized by the I.C.S.U., the International Council of Scientific Unions. Nearly 70 countries participated in it, and by all accounts it has been the biggest international cooperative effort that

has ever been made. Even the launching of the earth satellites, which figures so largely in our scientific perspective today, was part of this programme, though naturally the organizers of the I.G.Y. are modest enough to realize that the efforts in this field are much too big to be regarded merely as a part of the I.G.Y. programme. The results that have accrued from the I.G.Y. programme are of immense scientific value. Apart from the purely scientific results emanating from this, the mere fact of such an intensive cooperative effort for a common scientific cause, in which so many different countries participate, has a value of its own, quite as significant and permanent as the scientific outcome.

There are many fields in which cooperative effort is essential and has therefore become almost a regular feature. By its very nature, telecommunication is one of them, since telecommunication means ultimately world-wide communication and beyond. Meteorology is another, since the climate of a country depends nearly as much on what happens beyond its frontiers, as on what happens inside the country.

I am told that you were the earliest in organizing such international cooperation, that the Telecommunications Union is the oldest among the international Scientific Unions, and that even the World Meteorological Organization, old as it is, came much later. In a different sense too, you have contributed directly to international cooperation, namely in bringing literally the different parts of the world nearer and closer.

Apart from world-wide cooperation, which naturally is of more recent growth, if one looked back on some of the early cooperative efforts between different countries, one

would find that many of them have been in fields that are of interest to telecommunications, though in varying degrees.

Probably the earliest cooperative effort must have been for the determination of the figure of the earth. By the very nature of the subject it was necessary to arrange for extensive surveys to be made in many different parts of the world, and this implies cooperative effort. Starting with a sphere, the geographers were soon forced to approximate the figure of the earth to an oblate spheroid, and finally in desperation to name it the geoid, just as the chemists were tempted to call the chemical bonds between neighbouring atoms in a metal metallic bonds ! We haven't by any means arrived at the final figure of the earth yet; some of the recent calculations from the orbits of the artificial satellites, just as they have disturbed many of our previous concepts regarding the upper atmosphere and our immediate outer space, have also disturbed our previous concept regarding the geoid. They seem to point to a slight bulge of the earth south of the equator. We await further results.

The next important cooperative effort must have been that organized by Halley, after whom the famous comet is named, for the collection of magnetic data from different parts of the earth. We are indebted to Halley for many valuable things which he did for science. Apart from his own personal contributions, which were in diverse fields, and were immense, he was primarily responsible for the publication of Newton's Principia. "But for him", writes Augustus De Morgan, the well-known author of the fascinating book, A Budget of Paradoxes, "in all probability, that work (Principia) would not have been thought of, nor when thought of written, nor when written printed." He was also probably responsible for the

publication, though anonymously, of Newton's solutions to the two famous problems set by Leibnitz and Johann Bernoulli. Though published anonymously, Bernoulli could claim that "he recognized the lion by its paw !"

If I refer here particularly to his magnetic work, it is not merely because it was organized on a world-wide basis, mainly by his own personal efforts, but also because of the enormous contributions he made to this field, which is naturally of great interest to Telecommunications, ~~and~~ Unfortunately these contributions of his are not so well known. Indeed, he was far ahead of his time.

He knew, of course, that the magnetic poles of the earth deviated considerably from the geographical poles. Columbus was aware of it even earlier. In his famous voyage to the New World, the mariners seem to have noticed that the magnetic needle deviated considerably from the north-south direction, and threatened to mutiny, since they were unwilling to navigate in waters where even the proverbially dependable magnetic needle ceased to behave. The story goes that Columbus shifted the compass card suitably overnight, to make the needle point due north, so as to avoid mutiny.

But Halley knew further that the magnetic pole wobbled slowly round the geographic pole, and he correctly estimated the magnitude of this slow drift. Furthermore, he had a plausible explanation, in which he regarded the outer shell of the earth as being magnetized in a slightly different direction from the core, and postulated a slight lagging in the rotation of the core behind that of the shell. His estimate of the rate of this lag was about  $0.5^{\circ}$  per year, whereas modern estimates range from  $0.2^{\circ}$  to  $0.3^{\circ}$  per year.

Even this he intended only as a first approximation, reserving the postulate of more than one core to explain any more complicated secular variation of the earth's magnetic field.

In two classic papers published in <sup>(1683 and in)</sup> 1692 <sup>respectively,</sup> in the Philosophical Transactions of the Royal Society, not long after the founding of the Society, he anticipated many of the new and important results that were to appear in the later centuries. These papers had almost been forgotten, and we owe it to Sir Edward Bullard for having drawn our attention to them recently, on the occasion of the Tercentenary of the birth of Halley.

In commending these two papers, Sir Edward adds "It is not too much to say that by reading these two papers of Halley's one can learn more about the origin of the earth's magnetic field and its secular variation than will be found in all that has been written during the succeeding 250 years. Halley saw the essential points that the wide spread anomalies are inconsistent with a local origin and that the time scale of the secular change requires a cause independent of geology, and points to a mobile core. The argument has been carried further in recent years. We now know that the earth has a fluid core and can imagine processes that might maintain electric currents in it and thus a magnetic field. This gives a greater free dom than Halley's permanently magnetised solid core and allows the foci of the non-dipole field (Halley's extra poles) to wax and wane as well as moving westward. Halley got as far as he could without electro-magnetism, but it is surprising that no one went further for so long."

The magnetic work of Halley reminds me of similar work undertaken nearly 150 years later by Gauss, which was remarkable for the many outstanding results that flowed from it. It is a typical example of an epoch-making work, which had numerous ramifications. This work again, is not so well known, and for this reason I give it in some detail here.

On the basis of a detailed analysis of the magnetic data collected in different parts of the earth's surface, Gauss came to the conclusion that nearly 94% of the magnetic field at the surface should be attributed to causes inside

*small fraction*

the surface of the earth, and that the remaining ~~of~~ <sup>fraction</sup> should equally definitely be attributed to causes outside. The mathematical technique which he employed for the analysis of these data was his own, and he had such supreme confidence both in the soundness of the technique and in the results of the analysis that he proceeded to seek for a probable cause for this residual ~~of~~ <sup>fraction</sup>. The mechanism that he proposed was the presence of charged layers in the upper regions of the atmosphere, and their movements. It should be remembered that this was at a time when the earth's atmosphere was regarded as a good insulator of electricity and therefore not capable of sustaining any electric currents.

Gauss's confidence in the residual ~~of~~ <sup>(small fraction, of the order of a few per cent)</sup> as arising from causes outside the surface of the earth must have been uncanny indeed, to provoke him to seek for such a cause, however improbable it might have appeared to his contemporaries. I shall quote him in his own words, by which of course I mean in the English translation, to bring out the full implication of what I mentioned. I hasten to add that we know today that Gauss was right.

I now quote Gauss: "If we seek for the immediate causes partly or wholly, without the earth" - by which he means, of course, outside the earth's surface, "we can only think of galvanic current. But the atmosphere is no conductor of such currents, neither is vacant space; thus in seeking in the upper regions for a vehicle of galvanic currents we go beyond our knowledge." Mark these words of Gauss:

"We go beyond our knowledge", and Gauss adds "But our ignorance gives us no right absolutely to deny the possibility of such currents; we are forbidden to do so by the enigmatical phenomenon of the Aurora Borealis, in which there is every appearance that electricity in motion performs a principal part."

One is greatly impressed by the many different streams of thought that radiate out from this simple observation of a residual magnetic field whose causes should be sought for outside the surface of the earth. Let us take them one by one. Take for example, the postulate of a galvanic current in the upper regions of the atmosphere, which implies first the presence of a charged layer and secondly its movements. It is hardly necessary for me, addressing a gathering of telecommunication experts, to emphasize how prophetic these words are. We now know that all radio propagation over long distances, indeed several times round the earth under favourable conditions, is due precisely to the presence of such charged layers. Their movements are also subjects of intensive study today.

Take again his reference to "the enigmatic<sup>al</sup> phenomenon of the Aurora Borealis, in which there is every appearance that electricity in motion performs a principal part." In modern language, we will probably speak of charged particles in motion in the atmosphere. Think of invoking all this in relation to the magnetic field of the earth, and the implication that the predominance of the <sup>a</sup>auroral displays in the polar regions is connected with the concentration of these charged<sup>streaming</sup> particles near the magnetic poles.

Indeed, the first <sup>P</sup>polar <sup>Y</sup>Year which was organized nearly 76 years ago, during a period of sunspot maximum, ~~solar~~ activity, was almost directly a corollary to Gauss's uncanny manner of relating these various phenomena with one

another. It is significant that the detailed study of the auroral displays formed a major part of this programme.

The study of auroral displays obviously involves <sup>their</sup> spatial location and hence simultaneous observations from different observing centres spread over large distances, and was therefore a cooperative scientific effort.

The second <sup>P</sup> polar Year, which was organized 50 years later, this time during a period of sunspot minimum, was naturally much more extensive. The International Geophysical Year was the natural successor, and covered such a wide range of subjects that the <sup>name P</sup> ~~term~~ 'polar Year' ceased to be sufficiently descriptive of the diverse activities included in this programme, in which almost all countries participated. Naturally, the polar regions also, including this time the Antarctica, did figure prominently in the programme. The programme included many different fields of special interest to telecommunications.

While on the subject of the magnetic field of the earth, and sunspot activity, I may add in passing that we owe to Humboldt the expressive phrase "Magnetic storms", and it was he who first organized extensive studies of <sup>these</sup> storms.

Recently <sup>the</sup> earth's magnetic field has been studied at great heights, and its effect on incoming charged particles is detectable up to distances of the order of 15 times the radius of the earth. The field naturally drops down roughly as the inverse cube of the distance, but shows large deviations from this simple law of variation. The causes of these deviations, and their relation to the two prominent charged belts in outer space which were discovered by Allen, and others, are now subjects of intensive study in many centres. They indeed pose many challenging problems.

I have confined myself primarily to phenomena whose scientific study would not have been possible without international cooperation. There are other types of international cooperation too, <sup>namely</sup> for organizational purposes, or for purposes of world-wide implementation, in which fields also your Union has played a leading part. In the IGY programme, apart from the enormous scientific advance resulting from such an intensive cooperative effort, it was soon realised that such world-wide cooperation for a common purpose is of immense value on its own. There is a very significant episode, in the great Indian epic Mahabharata, composed probably two thousand five hundred years ago; when the humans were first blessed with the faculty of speech, the wise ones among them gathered together at a conference to decide on the best manner of utilizing this wonderful gift. At the conference they deliberated for a long time whether they should use this new faculty at all, and finally decided <sup>that</sup> they might in the cause of righteousness, and for the general good of humanity.

There is an unconscious humour underlying the convening of the conference, so soon after their being endowed with the new faculty, namely that they had already decided without their being aware of it that the organization of a conference was by itself a worthy objective for the use of the new faculty, irrespective of the outcome of the deliberations of the conference. There is an old proverb that says: If you have decided to fight somebody, do not talk to him. If you do, the chances are that you will change your mind about the fighting! Like the wise men in the epic the telecommunications engineers obviously came to the same conclusion in organizing their International Union far ahead of the other Unions, namely, that bringing together different groups of scientists and engineers working for a common cause, is by <sup>it</sup>self a worthy objective, apart from the valuable outcome of their deliberations.

Speaking of the scientific background to telecommunications, naturally I have to assign a high place to Maxwell's electromagnetic equations, which form the bed rock of all telecommunications. There is a well-known saying attributed to the great mathematician Lagrange, namely that no mathematics is good mathematics unless you can explain it to the first man you meet in the street. I am not sure whether much of the good mathematics that we know will answer this stringent test, unless the street that Lagrange was thinking of was a street near the mathematical Institutes in Göttingen or Sorbonne or Cambridge in their palmy days. Lest you think *proviso for exceptions* this is an exaggeration, I may mention an incident which is reported to have happened in one of the Cafes in Munich.

Professor Sommerfeld, whose name must be very familiar to all students of telecommunications, and some of his colleagues met at the Cafe, and not having writing material, used the marble top of the coffee table for working out their mathematics. They got stuck on the reduction of a difficult integral and had to leave without having found the solution. When they gathered round the same table the next day, they found that some one had supplied the solution !.

These exceptional streets apart, as I mentioned earlier, much of good mathematics that we know may not satisfy the stringent criterion of Lagrange. But there is a substratum of truth underlying this criterion, namely that all good mathematics is characterized by a certain simplicity and inevitability and a certain elegance which make it easier to get it across to an intelligent mathematician. It is this simplicity and elegance of good mathematics that make it eminently applicable to other branches of science, and it is almost an article of faith among the physicists that the simpler and more elegant the mathematics, the more frequent would be its applications.

I may hasten to add that there is hardly any branch of mathematics that does not ultimately become applicable. At a conference of mathematicians nearly thirty years ago, the question was posed whether an obstruse branch of mathematics like the partitioning of numbers does find any application. You all know the famous toast for mathematics : "May it be of no use to anybody at any time"! Gauss had obviously this famous toast in view when he claimed: <sup>that</sup> "If mathematics is regarded as the Queen of Sciences, then Arithmetic", by which Gauss meant the theory of numbers, which was his own

favourite subject, "should be regarded as the Queen of Mathematics", and added significantly "because it is the least useful".

Since the partitioning of numbers is an obstruse branch even in the theory of numbers, which according to Gauss is *the* least useful, it was regarded as a typical example of mathematics that was extremely unlikely to find any application, and hence the posing of the question that I referred to. But, surprisingly, came the answer from one of the members in the audience, namely that the theorem of partitioning of numbers was being applied for the study of the splicing of cables, a subject of great interest to telecommunications. There are two papers by H. P. Lawther on this subject, one in the American Mathematical Monthly for 1935, and the other in the Bell System Technical Journal for 1935. The latter is entitled "An application of number theory to the splicing of cables." I shall merely quote here the introductory paragraph in the paper. "The consideration of a simple and practical splicing scheme for minimizing the recurrence of same layer adjacencies among telephone circuits in long cables leads to a problem in Number Theory whose solution calls for some extension of the previous work in this field. That speculation upon an art so mundane as that of telephone cable splicing should have led to a proposition in the oldest and the most neglected branch of mathematics, seemed to be worthy of note, for few applications so practical have been found": which illustrates the point that I wished to make, namely that there is hardly any branch of mathematics that does not ultimately find application in other branches of science.

The more simple and elegant the mathematics, the more frequently does it find application. The partial differential equations are one such. Indeed, they are so ubiquitous that Einstein once remarked that the partial differential equations first came to theoretical physics as a servant, but by degrees became its master. Among the numerous publications of Eric Bell are two books under the titles "Mathematics: the Handmaid of the Sciences", and "Mathematics: the Queen of the Sciences". I do not know which of these books was written earlier, but we do know in which capacity mathematics came to physics first. She came as the handmaid, and stayed as the Queen.

This is particularly true of the famous electromagnetic equations of Maxwell. Hertz, who handled these equations more intimately than any other single author, and endowed them with a body, by his experimental demonstration of the *electromagnetic waves,* ~~existence in the laboratory,~~ referring to these equations makes the profound remark: "One cannot escape the feeling that these mathematical formulae have an independent existence and an intelligence of their own, that they are wiser than we are, wiser than even their discoverers, that we get more out of them than we put into them". We cannot quite guess what all unknown implications Hertz had in view, but in the light of later developments we can appreciate better today the profoundness of this statement. The well-known Lorentz transformation, which is regarded today as forming the basis of the Special Theory of Relativity, was indeed originally intended by Lorentz to reconcile the negative result obtained in the classical experiment of Michelson and Morley with the electromagnetic equations of Maxwell- In other words,

the Lorentz transformation is just the transformation that would be required to keep Maxwell's equations intact. The basic postulate in relativity, namely that the velocity of light in vacuo is independent of the velocity of the source or of the observer, will again be just the postulate required to ensure the integrity of Maxwell's equations.

The same Lorentz transformation that ensures the integrity of Maxwell's equations holds, as Einstein originally pointed out, and as we know now, not only for electrodynamics, but for the motion of material particles too, and for all natural phenomena. Lorentz, as Einstein remarked in a recent review of Lorentz's work, "was unaware of the fact that the transformation named after him belonged to a wider group. For him, Maxwell's equations concerning empty space applied only to a given system of coordinates, which, on account of its state of rest, appeared preferable in comparison to all other existing systems of coordinates. This was a truly paradoxical situation, since the theory appeared to restrict the inertial system more than classical mechanics. This circumstance, proving as it did, quite incompatible with the empirical standpoint, simply had to lead to the special relativity theory".

You may thus see how the great importance assigned by Hertz to the Electromagnetic Equations of Maxwell, and the supreme need - almost amounting to an article of faith - felt by him and by Lorentz for saving these equations from the many new and disconcerting experimental results that were emerging, paved the way to Einstein's postulate of the Special Theory of Relativity.

Before leaving the subject of Maxwell's equations, and the profound remark of Hertz's that they have an independent

existence and intelligence of their own, one may add that Hertz in common with some of the original thinkers of that period, like Lord Kelvin, and Maxwell, felt the need for a mechanical explanation. Referring to these attempts Helmholtz remarks that "these physicists have evidently derived a fuller satisfaction from such explanations than from the simple representation of physical facts and laws in the more general form, as given in systems of differential equations." He adds very significantly "For my own part, I must admit that I have adhered to the latter mode of representation and have felt safer in so doing." How modern it all sounds - one of those rare cases where the teacher is even more modern than his advanced disciple !

Thus telecommunications is a rich field for application of mathematics, but has also formed a very congenial field for the cooperation of the scientist and the engineer. The story is told that Hertz himself had some hesitation in the choice of a suitable career, particularly in the choice between engineering and physics. While posing his problem in a letter to his parents he remarks pertinently "I have not forgotten that I often used to say to myself that I would rather be a great investigator than a great engineer, but would rather be a second-rate engineer than a second-rate investigator." Wise reasoning indeed ! It was obviously the same background that made a distinguished visitor to the Mount Wilson Observatory remark, after seeing its spacious quadrangle, that it was "spacious enough to accommodate the automobiles of all the engineers and the walking sticks of all the astronomers."

Hertz decided to be in the front rank, and hence preferred physics to engineering, and in pursuance of this decision he discontinued engineering to be able to do physics. The inducement offered by Helmholtz by the announcement of a prize problem by the Berlin Academy on the subject, and the offer to Hertz, <sup>of</sup> the facilities of his laboratory, made Hertz's choice easier, we now know with what results.

The wide new field that opened up as a result of Hertz's classic discovery, namely telecommunications, has proved a very fertile field for the close collaboration of the engineer and the scientist. The distinction between the engineer and the scientist, — which in some fields is still nearly as sharp as the distinction between Gentlemen and Players at the Lords — has been well worn out in this field. Without this close collaboration the scientist would be isolated in his ivory tower. The engineer who ignores his basic sciences would be very much in the position of the well-known philosopher Prutkov, who poses the question: "Which is the more useful, the sun or the moon?" and himself supplies the answer, "Of course the moon, since it gives us light during the night when we most need it."

By a strange irony, one of those in which Nature delights, the same Hertz, who by the discovery of the electromagnetic waves in the laboratory was supposed to have placed the wave theory of light on a firm foundation, was also to discover the loss of electric charge from a metallic surface illuminated by ultra-violet light. We know now that it must have been photoelectric emission that was responsible for this: a phenomenon which later was regarded as the most effective

demonstration of the quantum nature of light.

The scientific background to the development and growth of telecommunications is a romantic one. I have naturally confined myself in this short address to a few of the highlights in this background ~~that are not as well known as they should be~~, and to a few of the outstanding men who have made this background so fruitful and so attractive. No wonder that the physicist finds this field of yours so congenial.

**Quelques aspects du fondement scientifique  
des télécommunications**

par K. S. KRISHNAN

Directeur du Laboratoire national de physique de l'Inde

Extrait du "JOURNAL DES TELECOMMUNICATIONS", no 8, août 1960

# Quelques aspects du fondement scientifique des télécommunications

par K. S. KRISHNAN

Directeur du Laboratoire national de physique de l'Inde

*(Résumé de la conférence prononcée par le professeur Sir Kariamanikkam S. Krishnan, Kt., D.Sc., LL.D., F.R.S., au cours du banquet organisé par l'Union internationale des télécommunications, à l'Hôtel des Bergues (Genève), le 21 novembre 1959.)*

*(Traduction)*

C'est pour moi un très grand honneur que d'avoir été invité à prendre la parole au banquet de l'Union internationale des télécommunications et je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ceux qui m'ont adressé cette invitation. Le fait qu'un simple physicien ait trouvé une place au milieu de spécialistes des télécommunications présente une certaine importance car il illustre une certaine forme d'interdépendance de disciplines voisines, ce qui est considéré depuis longtemps comme un élément à la fois caractéristique et réconfortant de tout progrès scientifique. De toute manière, cette interdépendance possède maintenant une longue histoire dans le domaine des télécommunications, qui sont au centre même de nos préoccupations au cours des conférences actuelles. J'aurai dans quelques instants l'occasion de traiter plus longuement de cette étroite collaboration entre les diverses disciplines scientifiques, et notamment de la collaboration entre le physicien et l'ingénieur qui s'est révélée si féconde dans le développement des télécommunications.

La présence de délégués éminents, venus de nombreuses parties du monde, me rappelle également l'extension de la coopération scientifique internationale à laquelle vous prenez une si grande part. La plupart d'entre vous connaissent le programme de l'Année géophysique internationale (AGI), organisée par le Conseil international des Unions scientifiques (CIUS). Près de 70 pays y ont participé et, à tous points de vue, nous avons certainement assisté là au plus grand effort de coopération internationale qui ait jamais été tenté. Même le lancement des satellites artificiels, qui occupe une place si importante dans les vues scientifiques modernes, s'est inscrit dans ce programme, bien que les organisateurs de l'AGI soient évidemment assez modestes pour comprendre que les efforts déployés dans ce domaine sont bien trop vastes pour qu'on puisse les considérer simplement comme une partie du programme de l'AGI. Les résultats de ce programme présentent une valeur considérable; en dehors même de ces résultats purement scientifiques, le simple fait qu'une coopération aussi intense se soit instaurée pour une même cause scientifique, à laquelle ont pris part tant de pays, présente en soi une valeur aussi grande et aussi durable que les résultats proprement dits.

Dans de nombreux domaines, la coopération est

devenue si essentielle qu'on en est venu à la considérer aujourd'hui comme une chose parfaitement normale. De par leur nature même, les télécommunications sont l'un de ces domaines car, en définitive, les télécommunications signifient la possibilité de communiquer avec le monde entier et au-delà. Un autre est la météorologie: le climat d'un pays dépend en effet presque autant de ce qui se passe au-delà de ses frontières que des phénomènes qui se déroulent sur son territoire.

Je me suis laissé dire que vous avez été les premiers à organiser une véritable coopération internationale; que l'Union internationale des télécommunications est la plus ancienne des organisations internationales. Même l'Organisation météorologique mondiale, pour ancienne qu'elle soit, a été fondée beaucoup plus tard. Dans un autre sens encore, vous avez directement contribué à la coopération internationale puisque vous avez littéralement uni et rapproché les uns des autres les diverses parties du monde.

Sans parler de la collaboration mondiale dont l'avènement est naturellement beaucoup plus récent, on constate, si l'on jette un regard en arrière vers les premières tentatives de collaboration entre les différents pays, que nombre d'entre elles ont été réalisées dans des domaines qui présentent, à des degrés divers, un intérêt pour les télécommunications.

Sans doute les premiers efforts accomplis en commun ont-ils porté sur la détermination de la forme de la terre. La nature même de la question impliquait l'organisation de relevés considérables en différentes parties du monde, ce qui nécessitait un effort de collaboration. Partant de l'hypothèse d'une terre sphérique, les géodésiens ont abouti à la détermination approximative d'un sphéroïde aplati qu'en désespoir de cause on a finalement appelé « géoïde », tout comme les liaisons chimiques entre atomes voisins d'un métal ont été appelées, par les chimistes, « liaisons métalliques ». Nous sommes encore loin d'avoir déterminé exactement la forme de la terre; quelques-uns des derniers calculs déduits des orbites de certains satellites artificiels sont venus déranger nos anciennes idées touchant le géoïde, comme ils avaient déjà modifié nos conceptions sur la haute atmosphère et l'espace extra-atmosphérique le plus proche. Il semble à présent que la terre présente un

renflement au-dessous de l'équateur. Nous attendons de nouveaux résultats.

Après ce premier essai de collaboration, nous en trouvons un autre, organisé par Halley, astronome qui a donné son nom à une célèbre comète, en vue de rassembler des données magnétiques relevées sur différentes parties de la terre. Nous devons à Halley un grand nombre de réalisations scientifiques de grande valeur. Outre ses nombreuses recherches dans divers domaines, c'est essentiellement à lui que nous devons la publication des *Principia* de Newton. « Sans lui — écrit Augustus De Morgan, l'auteur bien connu de l'ouvrage passionnant *A Budget of Paradoxes* —, il est très-probable que cet ouvrage (*Principia*) n'aurait jamais été conçu ; s'il avait été conçu, il n'aurait jamais été écrit ; s'il avait été écrit, il n'aurait jamais été imprimé. » C'est probablement aussi à Halley que nous devons la publication anonyme de la solution de Newton au fameux problème de Leibnitz et de Bernoulli ; c'est à propos de cette solution que, malgré l'anonymat, Leibnitz a déclaré « reconnaître le lion à sa griffe ». *Bernoulli*

Si je mentionne ici les travaux de Halley dans le domaine du magnétisme terrestre, ce n'est pas simplement parce qu'ils ont été organisés sur une échelle mondiale à la suite essentiellement de ses efforts personnels mais à cause de l'immense contribution de ce savant à une question qui présente, de par sa nature, un grand intérêt pour les télécommunications. Malheureusement, les travaux dont il s'agit ne sont pas assez connus. En vérité, Halley était très en avance sur son époque.

Halley savait, bien entendu, que les pôles magnétiques de la terre sont loin de coïncider avec ses pôles géographiques. Déjà Christophe Colomb s'en doutait avant lui. Au cours du fameux voyage qui le conduisit au Nouveau-Monde, les marins avaient remarqué que l'aiguille aimantée s'écartait considérablement de la direction Nord-Sud et ils menacèrent de se mutiner car ils ne voulaient pas naviguer dans des eaux où l'on ne pouvait même plus se fier à la boussole. L'histoire raconte que Colomb profita de la nuit pour déplacer suffisamment le cadre de la boussole afin que l'aiguille indique le Nord et lui épargne ainsi une révolte de son équipage !

Halley savait également que le pôle magnétique se déplace lentement autour du pôle géographique et il a exactement évalué l'ampleur de cette dérive. Il a également donné une explication plausible de ce phénomène en disant que le magnétisme de l'écorce terrestre s'exerce dans une direction légèrement différente de celui du noyau central, ce qui l'a amené à supposer que la rotation du noyau est en retard par rapport à celle de l'écorce. Il a estimé que ce retard est de  $0,5^\circ$  par an alors que, selon les estimations récentes, il serait de  $0,2^\circ$  à  $0,3^\circ$  par an.

Même ces résultats n'ont été présentés par Halley que comme une première approximation. Il devait également émettre l'hypothèse que la présence de plusieurs noyaux expliquerait éventuellement cer-

taines variations séculaires du champ magnétique terrestre.

Dans deux mémoires classiques, publiés en 1683 et en 1692, dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society*, peu après la fondation de cette société, il indiquait nombre de résultats importants qui ne devaient recevoir confirmation qu'au cours des siècles suivants. Ces deux mémoires avaient sombré dans un oubli presque total et nous devons à Sir Edward Bullard de les avoir signalés tout récemment à notre attention, à l'occasion du 300<sup>e</sup> anniversaire de la naissance de Halley.

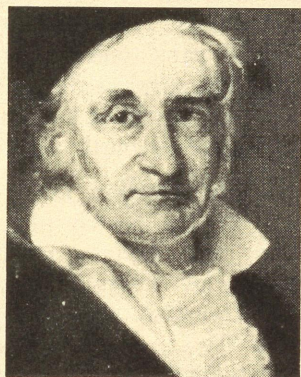
Après avoir fait l'éloge de ces deux articles, Sir Edward ajoute : « Il ne serait pas exagéré de dire que la lecture de ces deux articles de Halley nous apprend davantage sur l'origine du champ magnétique terrestre et sur ses variations séculaires que la lecture de tout ce qui fut écrit au cours des deux siècles et demi qui suivirent leur publication. Halley avait vu les aspects essentiels du problème, à savoir que des anomalies aussi étendues ne sauraient être attribuées à un phénomène local et que ce n'est donc pas dans la géologie qu'il faut rechercher les causes des variations séculaires qui, en raison même de leur durée, indiquent l'existence d'un noyau mobile. Cet argument a été développé au cours des dernières années. Nous savons à présent que la terre possède un noyau fluide et pouvons imaginer des processus capables d'y maintenir des courants électriques et, partant, un champ magnétique. Ce postulat est plus souple que celui de Halley imaginant un noyau solide, aimanté en permanence ; il suppose que les foyers d'un champ à plus de deux pôles (pôles supplémentaires de Halley) croissent et décroissent et se déplacent vers l'ouest. Halley est allé aussi loin qu'il l'a pu sans connaître l'électromagnétisme mais il est étonnant que, depuis, personne n'ait poussé plus avant pendant si longtemps. »

Les recherches de Halley sur le magnétisme me font penser à des travaux analogues entrepris, près de cent cinquante ans plus tard par Gauss, travaux remarquables du fait des nombreux résultats transcendants auxquels leur auteur a abouti. C'est un cas typique de recherches que l'on peut qualifier d'historiques et qui ont eu de nombreuses répercussions. Ces travaux, eux non plus, ne sont pas très connus et c'est pourquoi j'en donnerai maintenant une relation quelque peu détaillée.

Après une analyse approfondie de données sur le champ magnétique recueillies en différents points de la surface terrestre, Gauss en est arrivé à la conclusion que, dans la proportion de 94%, le champ magnétique régnant à la surface de la terre devait être attribué à des phénomènes qui s'exercent au-dessous de cette surface, le reste étant dû sans conteste à des phénomènes extérieurs à la masse du globe. Gauss élaborait lui-même la méthode mathématique qu'il employa pour analyser ces données, et il avait une telle confiance dans cette méthode et dans les résultats de son analyse qu'il se mit en devoir de rechercher la cause probable pouvant expliquer la fraction restante.

Il proposa un mécanisme dans lequel intervenaient des couches chargées d'électricité dans la haute atmosphère ainsi que les mouvements de ces couches. Il convient de noter que cette hypothèse était émise à une époque où l'on considérait l'atmosphère terrestre comme un bon isolant au point de vue électrique et, de ce fait, incapable de conduire des courants.

Il fallait que l'hypothèse, selon laquelle la petite fraction de l'ordre de quelques pour cent du champ magnétique est due à des causes extérieures à la surface terrestre, fût étrangement ancrée dans la conviction de Gauss pour que celui-ci recherchât une telle cause, si improbable qu'elle pût paraître à ses contemporains. Je citerai ses propres paroles pour bien souligner toutes les conséquences possibles d'une telle hypothèse. Je m'empresse d'ajouter que nous savons aujourd'hui que Gauss avait vu juste.



K. F. Gauss, 1777-1855

Voyons ce que dit Gauss : « Si nous recherchons les causes immédiates, partielles ou totales, sans la terre » — il veut dire, naturellement, à l'extérieur de la terre —, « nous sommes obligatoirement amenés à penser au courant galvanique. Mais l'atmosphère, pas plus que l'espace, n'est capable de conduire de tels courants ; ainsi, si nous cherchons dans les régions situées à grande altitude des éléments conducteurs de courants galvaniques, nous allons au-delà des limites de nos connaissances ». Retenons bien ces derniers mots de Gauss : « Nous allons au-delà des limites de nos connaissances », et Gauss ajoute : « Mais notre ignorance n'est pas une raison suffisante pour nous autoriser à nier catégoriquement l'existence possible de tels courants ; nous n'en avons pas le droit, étant donné le phénomène mystérieux des aurores boréales, dans lequel il semble bien que le rôle principal soit joué par de l'électricité en mouvement ».

On ne saurait rester insensible à tant de courants de pensée différents qui jaillissent de la simple observation d'une fraction résiduelle inexplicée du champ magnétique dont il convient de rechercher les causes à l'extérieur de la terre. Analysons-les à tour de rôle. Considérons, par exemple, le postulat de l'existence d'un courant galvanique dans la haute

atmosphère, lequel implique, d'une part, la présence d'une couche chargée d'électricité et, d'autre part, que cette couche est en mouvement. Je n'aurai pas le mauvais goût, m'adressant à une assemblée de spécialistes des télécommunications, de souligner combien ces paroles étaient prophétiques. Nous savons aujourd'hui que toute propagation radio-électrique à grande distance — cette distance pouvant même être un multiple de la circonférence terrestre lorsque les conditions sont favorables — a lieu précisément grâce à la présence de ces couches ionisées. Les mouvements de ces couches font actuellement l'objet d'études poussées.

Voyons maintenant ce que Gauss dit au sujet du « phénomène mystérieux des aurores boréales, dans lequel il semble bien que le rôle principal soit joué par de l'électricité en mouvement ». Aujourd'hui, nous parlerions probablement de particules ionisées en mouvement dans l'atmosphère. Il est frappant de constater que toutes ces questions ont été évoquées à propos du champ magnétique terrestre, et qu'on a pu en conclure que la prédominance des aurores boréales dans les régions polaires s'explique par la concentration des particules ionisées qui jaillissent au voisinage des pôles magnétiques.

En vérité, la première année polaire, organisée il y a presque 76 ans en coïncidence avec un maximum de l'activité solaire, a été une conséquence quasi directe de l'hypothèse étonnante par laquelle Gauss établissait une corrélation entre ces différents phénomènes. Il est remarquable que l'étude détaillée des aurores ait constitué un chapitre important du programme de cette année polaire.

Il est bien évident que l'étude des aurores pose des problèmes sur leur emplacement dans l'espace, d'où la nécessité de faire des observations simultanées dans un certain nombre de centres disséminés dans de vastes régions ; on voit que cette étude a fourni l'occasion d'une coopération dans l'effort scientifique.

La deuxième année polaire fut organisée cinquante ans plus tard, cette fois au moment d'un minimum de l'activité solaire ; il était naturel qu'elle donnât lieu à des travaux beaucoup plus nombreux. Ces années polaires furent suivies tout naturellement de l'Année géophysique internationale, laquelle a embrassé des disciplines tellement variées que le terme « année polaire » ne suffisait plus pour décrire les diverses activités prévues au programme de cette « année », à laquelle ont participé presque tous les pays. Bien entendu, les régions polaires, y compris cette fois l'Antarctique, figuraient en bonne place dans les sujets d'étude de ce programme. Celui-ci prévoyait d'ailleurs l'étude d'un grand nombre de problèmes qui présentent un intérêt spécial pour les télécommunications.

Puisque j'ai parlé du champ magnétique terrestre et de sa corrélation avec l'activité solaire, j'ajouterai en passant que c'est à Humboldt que nous devons l'expression si frappante d'« orages magnétiques », et que c'est ce savant qui, le premier, a organisé l'étude en grand de ces orages.

On a récemment étudié le champ magnétique terrestre à de très hautes altitudes. Ses effets sur les particules ionisées incidentes peuvent être détectés à des distances allant jusqu'à quinze fois le rayon de la terre. L'intensité du champ diminue naturellement très vite d'après la loi bien connue de l'inverse du cube de la distance, mais la courbe expérimentale présente des écarts notables par rapport à une loi aussi simple. Les causes de ces écarts et leur relation avec les deux grandes ceintures de particules chargées, situées dans l'espace extra-atmosphérique, qui ont été découvertes par Allen *et al.* et, tout particulièrement leur relation avec les courants en forme d'anneaux situés également dans l'espace extra-atmosphérique, font l'objet actuellement d'études très approfondies dans bon nombre de centres. Ce sont là des problèmes qu'on peut qualifier de gageure.

J'ai borné mon propos aux phénomènes dont l'étude scientifique aurait été impossible sans la coopération internationale. Cette coopération peut encore s'exercer dans d'autres domaines, dans celui de l'organisation, par exemple, ou dans celui de la mise en vigueur de règlements à l'échelle mondiale et, ici encore, votre Union a joué un rôle de premier plan. Dans l'application du programme de l'AGI, indépendamment des progrès scientifiques considérables qui ont pu être accomplis grâce à ce grand effort de coopération, il est apparu rapidement que cette coopération mondiale en vue d'un objectif commun présente un très grand intérêt en soi. On trouve un épisode extrêmement émouvant dans la grande épopée indienne du *Mahabharata*, écrite il y a probablement deux mille cinq cent ans ; lorsque les humains reçurent le don de la parole, leurs sages se réunirent en conférence afin de décider de la meilleure manière d'utiliser ce don merveilleux. Cette conférence délibéra longtemps sur la question de savoir s'il y avait lieu, en fait, d'utiliser cette nouvelle faculté et finalement elle opta pour l'affirmative, dans l'intérêt de la justice et pour le bien de l'humanité en général.

Il y a une ironie cachée dans le fait que cette conférence ait été convoquée si peu de temps après que les humains eurent reçu la faculté de parler ; je veux dire que, sans en avoir conscience, les hommes avaient décidé que l'organisation d'une conférence était en soi un objectif digne de l'emploi de cette nouvelle faculté, abstraction faite des décisions qui pourraient être adoptées par la conférence. Il existe un vieux proverbe qui dit : « Si tu as décidé de combattre quelqu'un, ne lui adresse pas la parole car si tu lui parles, tu risques de perdre l'envie de le combattre ! » On peut croire que les ingénieurs des télécommunications sont arrivés à la même conclusion que les sages de l'épopée puisqu'ils ont organisé leur Union internationale bien avant les autres. Ils ont compris que le fait de réunir différents groupes de savants et d'ingénieurs travaillant pour une cause commune est un objectif de valeur intrinsèque, abstraction faite des conclusions auxquelles pourraient aboutir leur délibérations.

A propos du fondement scientifique des télécommunications, je dois réserver une place toute

spéciale aux équations de Maxwell car elles constituent la clef de voûte des télécommunications. Selon le mot bien connu du grand mathématicien Lagrange, « il n'y a de bonnes mathématiques que celles qu'on peut expliquer au premier homme rencontré dans la rue ». Je me demande si la plupart des mathématiques que nous connaissons subiraient avec succès cette épreuve sévère à moins, naturellement, que la rue à laquelle pensait Lagrange n'ait été une artère proche des instituts de mathématiques de Göttingue, de la Sorbonne ou de Cambridge à leur époque florissante. Pour vous prouver qu'il n'y a là rien d'exagéré, je me permettrai de vous citer un incident qui s'est passé, dit-on, dans un café de Munich.

Voici : le professeur Sommerfeld — dont le nom est bien connu de tous les spécialistes des télécommunications — se trouvant avec quelques collègues dans un café et n'ayant pas de quoi écrire, inscrivit sur le marbre d'une table une équation dont il cherchait la solution. Arrêtés par une formule particulièrement difficile, le professeur et ses compagnons s'en allèrent sans avoir trouvé cette solution. Quelle ne fut pas leur surprise de constater le lendemain, lorsqu'ils se retrouvèrent à la même table, que quelqu'un avait trouvé la solution à leur place !

Ces avenues exceptionnelles mises à part, il est possible, comme je l'ai relevé plus haut, qu'une grande partie de nos bonnes mathématiques ne satisfassent pas au dur critère de Lagrange. Il nous faut cependant reconnaître que ce critère est fondé sur une vérité, à savoir, que toutes bonnes mathématiques sont caractérisées par ce qu'elles ont de simple, d'inévitable, d'élégant aussi, qui les rend plus facilement accessibles à un mathématicien intelligent. Cette simplicité et cette élégance des bonnes mathématiques les rendent éminemment applicables aux autres domaines scientifiques, et c'est presque un axiome chez les physiciens que plus les mathématiques sont simples et élégantes, plus leur application est fréquente.

Je m'empresserai d'ajouter qu'il n'est guère de branche des mathématiques qui, en fin de compte, ne devienne applicable. Lors d'une conférence de mathématiciens qui eut lieu il y a près de trente ans, on en vint à se demander si une branche aussi abstruse des mathématiques que la répartition des nombres se prêtait à une application quelconque. Sans doute connaissez-vous le toast fameux que l'on porte aux mathématiques : « Puissent-elles ne jamais servir à personne ! ». C'est probablement ce que pensait Gauss lorsqu'il prétendait que « si l'on considère les mathématiques comme la reine des sciences, il faut alors que l'arithmétique » — Gauss voulait dire la théorie des nombres qui était son sujet favori — « soit la reine des mathématiques », et, de manière significative, il ajoutait : « *parce que c'est elle qui est la moins utile* ».

Puisque la répartition des nombres est une branche abstruse même dans la théorie des nombres, la moins utile selon Gauss, on l'a considérée comme un exemple de mathématiques dont l'application est

la moins probable, et c'est ainsi qu'on en est venu à poser la question que je viens de vous citer. Or, à la surprise générale, c'est une personne présente dans la salle qui nous en a donné la réponse ; en effet, le théorème de la répartition des nombres est appliqué à l'étude des épissures des câbles, sujet qui présente un grand intérêt pour les télécommunications. On trouve deux articles de H. P. Lawther sur ce sujet, l'un dans l'*American Mathematical Monthly* (1935) et l'autre dans le *Bell System Technical Journal* (1935). Ce dernier est intitulé « *L'application de la théorie des nombres aux épissures des câbles* ». Je me contenterai d'en citer le premier paragraphe. « L'élaboration d'un schéma simple et pratique pour épisser les câbles en vue d'éviter la proximité répétée entre les couches de plusieurs circuits téléphoniques dans les câbles à grande distance se ramène à un problème de la théorie des nombres dont la solution appelle une extension des travaux effectués précédemment dans ce domaine. Que la recherche d'une solution dans une branche aussi prosaïque que l'épissure des câbles téléphoniques nous ait fait remonter à la branche la plus ancienne et la plus négligée des mathématiques, voilà un fait digne d'être signalé car on a vu jusqu'ici peu d'applications aussi pratiques. » Cet exemple illustre bien ma thèse, à savoir qu'il n'est guère de branche des mathématiques qui ne trouve en fin de compte une application dans d'autres branches de la science.

Plus les mathématiques sont simples et élégantes, plus leur application est fréquente. Les équations aux dérivées partielles en sont un exemple. Elles sont omniprésentes à un degré tel qu'Einstein, un jour, fit observer que si les équations aux dérivées partielles étaient entrées en physique théorique en qualité de servantes, elles ont fini peu à peu par s'imposer au poste de commandement. Parmi les nombreux ouvrages d'Eric Bell, on en trouve deux qui portent respectivement les titres de *Mathematics : the Handmaid of the Sciences* (Les mathématiques, servantes des sciences) et *Mathematics : the Queen of the Sciences* (Les mathématiques, reine des sciences). Je ne sais lequel de ces ouvrages a été écrit en premier lieu mais nous savons quel rôle ont tout d'abord joué les mathématiques dans la physique. Elles sont venues à nous comme une servante ; elles sont maintenant notre reine.

Cela est particulièrement vrai dans le cas des célèbres équations de Maxwell. Hertz, qui s'est servi de ces équations de manière beaucoup plus approfondie que n'importe quel autre auteur et qui les a dotées d'une charpente grâce à la démonstration expérimentale des ondes électromagnétiques, a fait à leur sujet la remarque suivante : « On ne peut échapper au sentiment que ces formules mathématiques ont une existence indépendante et une intelligence propre, qu'elles ont une sagesse supérieure à la nôtre, supérieure même à la sagesse de ceux qui les ont découvertes et que nous en tirons beaucoup plus que nous n'y mettons. » Nous ne pouvons tout à fait deviner ce que voulait dire Hertz mais, compte tenu des progrès ultérieurs, nous pouvons mieux percevoir

aujourd'hui la profondeur de cette remarque. La transformation bien connue de Lorentz, qu'on considère aujourd'hui comme étant à la base de la théorie de la relativité restreinte, fut d'abord conçue par son auteur pour concilier les résultats négatifs obtenus dans l'expérience classique de Michelson et Morley avec les équations de Maxwell. En d'autres termes, la transformation de Lorentz est précisément celle qu'il faut pour conserver les équations de Maxwell invariantes. Le postulat fondamental de la relativité, selon lequel la vitesse de la lumière dans le vide est indépendante de celle de la source ou de celle de l'observateur, n'est, lui aussi, que le postulat nécessaire pour assurer l'invariance des équations de Maxwell.

La même transformation de Lorentz qui assure l'invariance des équations de Maxwell s'applique, comme l'a indiqué tout d'abord Einstein et comme nous le savons à présent, non seulement à l'électron dynamique mais aussi au mouvement des particules matérielles et à tout phénomène naturel. Einstein a fait observer dans un ouvrage récent sur Lorentz que celui-ci « ignorait que la transformation qui porte son nom appartient à un groupe plus vaste. Pour lui, les équations de Maxwell relatives à l'espace vide s'appliquaient seulement à un système donné de coordonnées qui, en raison de son état de repos, semblait préférable à tous les autres systèmes de coordonnées connus. C'était une situation véritablement paradoxale car la théorie semblait imposer plus de restrictions au système inerte que la mécanique classique. Cette conjoncture s'étant révélée tout à fait incompatible avec la conception empirique a abouti inévitablement à la théorie de la relativité restreinte ».

Vous voyez donc que l'extrême importance accordée par Hertz aux équations de Maxwell et le besoin irrésistible — voire la profession de foi — qui poussaient Hertz et Lorentz à préserver ces équations des nombreux résultats expérimentaux qui venaient les contredire, ont préparé le terrain au postulat d'Einstein sur la théorie de la relativité restreinte.

Avant de quitter les équations de Maxwell et l'axiome de Hertz qui leur accordait une existence indépendante et une intelligence propre, il convient d'ajouter que Hertz, de même que certains penseurs éminents de cette époque, tels que Lord Kelvin et Maxwell, éprouvait le besoin de trouver à ce phénomène une explication mécanique. Commentant d'une manière générale ces tentatives, Helmholtz fait observer que « ces explications ont, de toute évidence, donné plus de satisfaction à ces physiciens que la simple représentation des faits et lois physiques de établi la théorie ondulatoire de la lumière, devait également découvrir la diminution de la charge électrique d'une surface métallique irradiée par des ultra-violetts. Nous savons à présent que c'est une émission photoélectrique qui avait dû provoquer ce phénomène, plus tard considéré comme la démonstration la plus valable de la nature quantique de la lumière.

Le fondement scientifique du développement des télécommunications ne manque pas de romantisme. Je me suis borné à en indiquer, dans ce bref exposé, quelques éléments essentiels et à citer quelques

hommes éminents qui ont contribué à rendre ce fondement si fécond et si passionnant. Faut-il encore s'étonner que le physicien se sente des affinités avec les télécommunications ?

*K.S. Krishnan*