réelle, parce qu'on est soi-même une réalité dans un monde qui lui auissi est quelque chose de réel; – ici, dans cette salle à boire, les clients avaient beau eu se pencher au commencement sur la boîte, cherchant à distinguer par les ouvertures comment c'était fait en dedans et à connaître le truc; ils ont vite fait de voir qu'il n'y avait rien à voir, point de rouleaux, ni de rouages, ni de disque, ni d'aiguille, rien que des lampes, et c'était la grosse Sidonie qui décidait d'un simple mouvement des doigts quel pays allait se faire entendre: une femme comme nous, de sorte qu'ayant connu le miracle, du même coup ils l'avaient accepté.
Maintenant ils n'écoutaient même plus ce que disait le poste qui était comme un robinet et le matin on ouvrait le robinet» ... Il y a déjà soixante ans! A présent que l'on vient de fêter les septante-cinq années de la naissance de notre Radio romande et les cinquante ans de la mort de l'écrivain, il n'est peut-être pas inutile, à l'aube du XXIème siècle, de songer un instant au pas de géant qu'a franchi la science depuis lors. Vers notre bien-être, certainement; du moins faut-il l'espérer! ...

Références:

Victor Konetski: «Du givre sur les fils», préface et traduction de Jean Cathala, Juillard 1967.

C.-F. Ramuz: «Si le soleil ne revenait pas» Mermod, Lausanne 1937.

TECHNIK

Redaktion: Dr. Peter Erni (HB9BWN), Römerstrasse 34, 5400 Baden
Packet: HB9BWN @ hb9aj Compu Serve: 100602, 1507

Essai d'explication des Equations de Maxwell

Werner Tobler (HB9AKN), Chemin de Palud 4, 1800 Vevey

Part 2

1ère équation de Maxwell

$\nabla . \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$

Cette première équation met en jeu le seul champ électrique $\mathbf{E}$ et s'intéresse au comportement de son flux à travers une surface fermée. Elle peut se lire ainsi:

Le flux de $\mathbf{E}$ à travers toute surface fermée =

$$\frac{\text{la charge électrique totale intérieure}}{\varepsilon_0}$$

où ε_0 représente une constante caractéristique du milieu dans lequel se trouve le champ électrique $\mathbf{E}$.
Prenons le cas simple d'une seule charge électrique, que nous prendrons positive. Les lignes du champ électrique qu'elle engendre sont comme les épines d'un oursin, dirigées vers l'extérieur, elles divergent.

Remarque:
Ce fait amène une autre formulation possible de cette équation en introduisant un être mathématique appelé «la divergence» et qu'on écrit en abrégé div $\mathbf{E}$. Cette écriture conserve un caractère descriptif. On a donc:
div $\mathbf{E} = \nabla . \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$
Ainsi, pour toute surface fermée entourant la charge ρ, on assiste à un écoulement du champ électrique $\mathbf{E}$ vers l'extérieur comme s'il fuyait (donc il diverge vraiment). L'équation indique aussi que s'il n'y a pas de charge contenue à l'intérieur de la surface, (si ρ=0), le flux de $\mathbf{E}$ est nul. En tout autre circonstance, le flux de $\mathbf{E}$ est non nul et proportionnel aux charges contenues à l'intérieur de cette surface.
Cette équation ne concernait que le seul champ électrique $\mathbf{E}$. On sait pourtant que celui-ci entretient d'étroites relations avec le champ magnétique sur la nature desquelles la deuxième équation de Maxwell va lever une partie du voile. L'essentiel de l'électromagnétisme réside dans cette prise de conscience.

2ème équation de Maxwell

$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t$

L'énoncé de cette équation est:

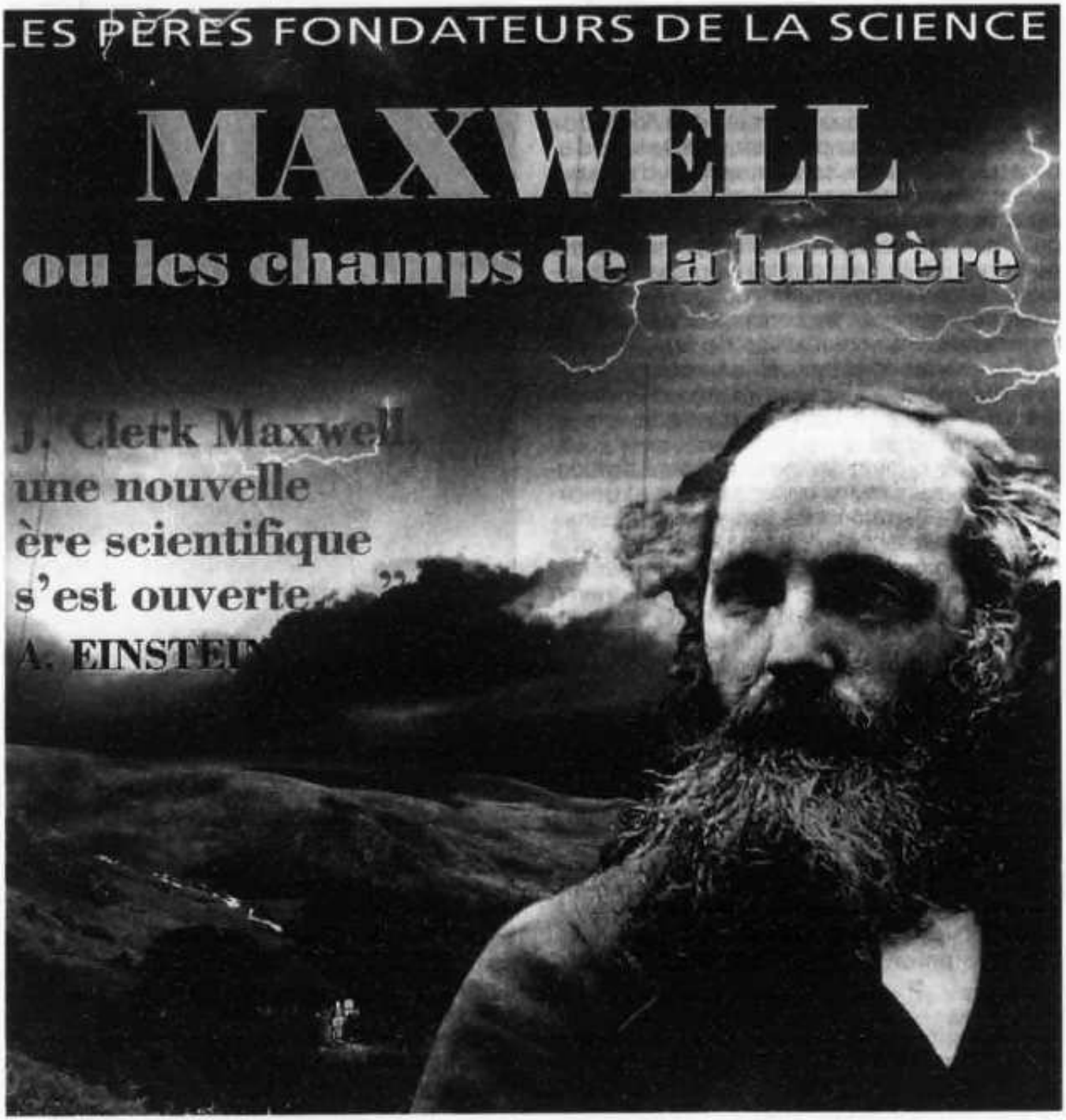
La circulation de $\mathbf{E}$ le long d'une courbe C =

$\frac{\partial}{\partial t}$ (flux de $\mathbf{B}$ à travers S).

Remarque:
On voit que selon les symboles utilisés $\nabla . \mathbf{E}$ ou bien $\nabla \times \mathbf{E}$ pour le premier membre respectivement de la première ou de la seconde équation, la signification physique changera. On aura pour la première équation: «Le flux de $\mathbf{E}$ à tra-

vers toute surface fermée» On aura pour la deuxième équation: «La circulation de **E** le long d'une courbe». On voit donc l'importance de la parfaite compréhension des symboles utilisés, et comme ces symboles sont loin d'être normalisés, on comprend mieux pourquoi il est si difficile d'aborder ces problèmes.

Remarque:
Ces deux écritures différentes ayant des significations physiques différentes, on l'expérimente pratiquement en utilisant une boucle de Hertz pour visualiser le courant HF créé par la circulation de **E** le long d'une courbe, donc pour identifier la variation de champ magnétique,



UNE THÉORIE EN QUATRE LIGNES

(deuxième équation de Maxwell) (voir figure 6). On identifiera la variation de champ électrique **E** grace à un dispositif présentant non plus une courbe, mais une surface (première équation de Maxwell) (voir figure 7).
Ces deux figures nous donnent la possibilité de capter les champs électriques et magnétiques dans les trois dimensions.
Les champs électriques et magnétiques sont liés dès que le temps intervient. Le symbole $\partial/\partial t$ exprime une petite variation en fonction du temps de la grandeur auquel il s'applique. Cette deuxième équation met en évidence la circulation d'un champ électrique **E** le long d'une courbe C, cette courbe servant d'appui à une surface quelconque S (voir figure 5). Sous cette deuxième expression, l'équation montre qu'il faut une variation du champ magnétique (le terme $\partial\mathbf{B}/\partial t$) pour produire un champ électrique **E** dans une boucle conductrice C. Les charges électriques du conducteur se mettront en mouvement sous l'action de la force créé par le champ électrique **E**, un courant circulera. On reconnaît ici sans grande difficulté la formalisation du phénomène d'induction, la loi de Faraday.
La figure 5 ci-jointe indique comment s'articulent dans l'espace les notions de flux et de circulation. Cette représentation est extraordinaire et m'a personnellement beaucoup apporté dans la compréhension. Sur cette représentation, on remarque ainsi très bien que le champ de vecteur électrique **E** le long de C sera toujours perpendiculaire à la surface S, donc à la composante du champ magnétique **B** dont la variation a donné naissance à **E**. Ceci quelque soit la forme et la longueur de C, ainsi que la forme et la valeur de la surface de S. Ainsi, que l'on considère un vulgaire sac à billes de notre enfance, ou une belle mongolfière de Chateau d'Oex, on pourra toujours comprendre comment s'articule dans l'espace les notions de flux et de circulation, et l'un comme l'autre présenteront une surface S associée à un pourtour C.

3ème équation de Maxwell

$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Cette équation est la plus simple. Symétriquement à la première, elle ne s'intéresse qu'à un seul champ, ici le champ magnétique **B**, et sa lecture peut s'effectuer ainsi:

Le flux de **B** à travers toute surface fermée=0

Le 0 à droite du signe = traduit précisément le fait qu'à partir d'un aimant, les lignes du champ magnétique ne divergent pas. Celles qui partent de l'aimant tournent, tournent et finissent tôt ou tard par y revenir. **Ainsi, tout ce qui sort finit par retraverser la surface fermée.** Au bilan le flux de **B** doit bien être toujours nul. Cette constatation traduit aussi le fait qu'il n'existe pas d'équivalent magnétique à la charge électrique. La nature n'offre pas de «masses magnétiques séparées», elles n'existent que par paires. Si l'on coupe un aimant permanent en deux et qu'on répète l'opération jusqu'au niveau le plus élémentaire, on ne parvient jamais à séparer un pôle magnétique nord d'un pôle magnétique sud.

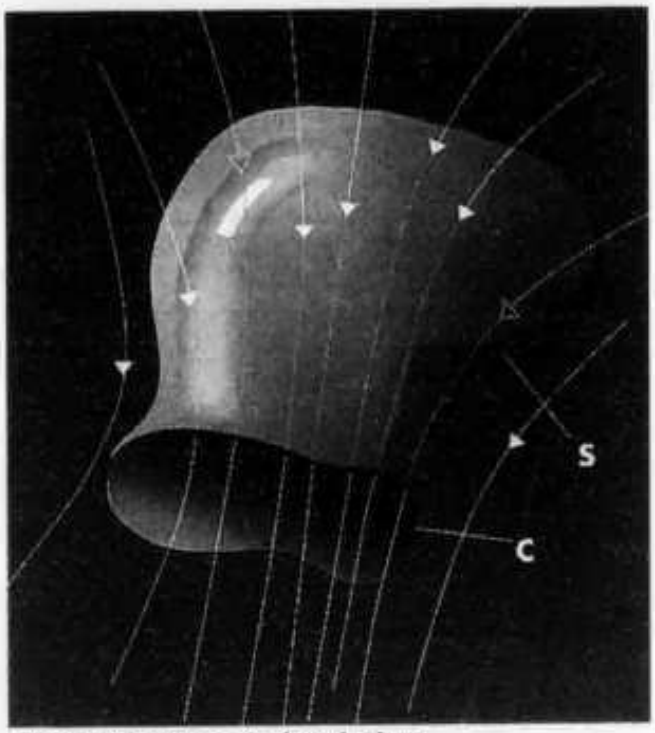


Figure 5: Flux et circulation
Comment articuler les notions de flux et de circulation: dans un écoulement en trois dimensions, représenté ici par quelques lignes de champ, installons par la pensée une courbe fermée C, de forme arbitraire. De même, considérons une surface S, de forme tout aussi quelconque, dont la seule contrainte est de «s'appuyer» sur la courbe C (la surface S est donc non fermée). Dans ses deuxième et quatrième équations, liant champ électrique et champ magnétique, Maxwell utilise avec profit cette notion de surface s'appuyant sur une courbe fermée: il articule la circulation d'un champ de vecteur (**E**) *le long de C avec le flux, plus exactement avec la variation du flux d'un autre champ de vecteur* (**B**) *à travers S.*

Remarque:
Comme pour l'équation 1 on peut aussi écrire: div **B** =0 pour exprimer que la divergence est nulle.

D'où provient donc le magnétisme? C'est la quatrième équation de Maxwell qui va répondre à cette question. C'est la plus complexe.

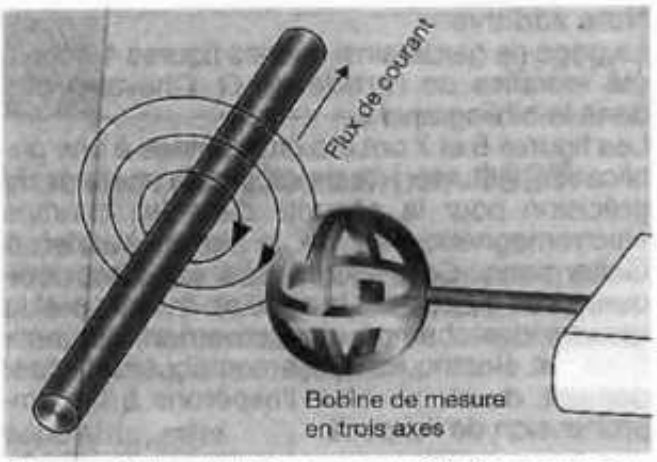


Figure 6: *Les bobines sont utilisées pour mesurer les champs magnétiques; la tension induite correspond à une mesure d'intensité de champs. L'appareil de mesure détermine un résultat global basé sur les résultats individuels pour chacune des trois bobines.*

4ème équation de Maxwell

$c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \partial \mathbf{E}/\partial t + \mathbf{j}/\varepsilon_0$

Cette équation fût paraît-il la plus difficile à faire émerger. Elle exprime que, pour toute surface S s'appuyant sur une courbe C (voir figure 5) on a:

c^2 (circulation de $\mathbf{B}$ le long de C) =

$$\frac{\partial}{\partial t} \text{ (flux de } \mathbf{E} \text{ à travers S) + } \frac{\text{flux du vecteur densité de courant à travers S}}{\varepsilon_0}$$

L'asymétrie avec la deuxième équation, qui faisait dépendre la création d'un champ électrique $\mathbf{E}$ de la variation d'un champ magnétique $\mathbf{B}$ est flagrante: aux constantes près, un terme supplémentaire règle en effet les relations entre circulation de $\mathbf{B}$ et flux de $\mathbf{E}$.
Pour «faire parler» cette équation, on considère le cas le plus simple, celui ou le champ électrique ne varie pas avec le temps: le premier terme à droite de l'équation est donc nul. L'équation pose alors la proportionnalité entre la circulation du champ magnétique $\mathbf{B}$ et le flux d'une nouvelle grandeur, le vecteur densité de courant $\mathbf{j}$. La densité de courant est la charge qui s'écoule à travers une surface unité en une seconde. Comme son orientation a une importance, c'est donc d'un vecteur qu'il s'agit. On retrouve ainsi l'explication de l'expérience d'Oersted. Un courant constant engendre un champ magnétique constant dont les lignes de champ forment des cercles concentriques autour du fil conducteur (voir figure 6).

Remarque:
Puisque ces lignes sont sujettes à des rotation, Maxwell a créé une expression imagée pour exprimer la circulation de $\mathbf{B}$ le long de C. Curl $\mathbf{B}$ en anglais (curl signifiant boucle) en français on parle de rotationnel de $\mathbf{B}$. On a:
rot $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{B}$
donc la quatrième équation peut aussi s'écrire:
c^2 rot $\mathbf{B} = \partial \mathbf{E}/\partial t + \mathbf{j}/\varepsilon_0$
de même
rot $\mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{E}$
la 2ème équation de Maxwell peut s'écrire:
rot $\mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t$
Un champ magnétique peut aussi être créé par un effet dynamique, la variation du champ électrique $\mathbf{E}$. Ce qu'exprime le premier terme ($\partial \mathbf{E}/\partial t$) analogue au ($\partial \mathbf{B}/\partial t$) de l'équation 2 écrite par Maxwell.
Le phénomène d'Oersted ne relève pas strictement de l'électrodynamique, bien qu'il mette en jeux des courants, donc des déplacements d'électrons, puisque **un courant constant crée und champ magnétique constant.**
Reste la constante qui figure en tête de l'équation c^2, le carré de la vitesse de la lumière. Les deux termes à droite de la dernière équation soulignent l'origine de tout champ. Maxwell fait apparaître la vitesse de la lumière au cours de la construction de son système d'équations, elle était nécessaire pour en assurer la cohé-

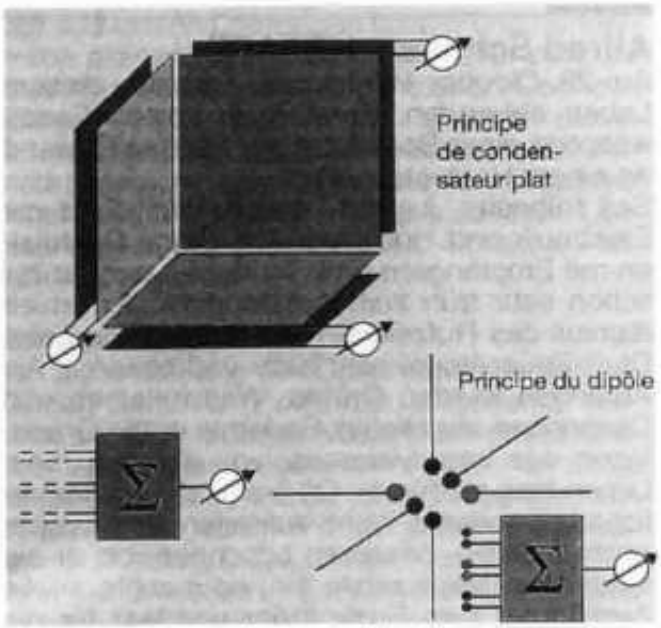


Figure 7: *Les champs électriques sont mesurés avec le principe de condensateur plat ou le principe du dipôle. Les différents potentiels apparaissent lorsque ces éléments sont placés dans un champ électrique. L'appareil de mesure convertit les résultats pour chacun des trois axes spatiaux en un résultat global.*

rence. Le déroulement de ses calculs théoriques l'avait entraîné sur un terrain inattendu, la lumière ne serait-elle rien d'autre qu'une onde électromagnétique?
Ainsi donc quatre lignes de signes tracés sur le papier suffisent à résumer l'électricité, le magnétisme et la lumière, condensant ainsi la théorie la plus précise de la physique classique. Leur universalité fait leur gloire.

Conclusions
J'espère que le lecteur aura apprécié ce retour aux sources mêmes de l'électricité et de ses lois fondamentales si souvent oubliées hélas, par la fébrilité de l'époque actuelle. Tout le monde ou presque utilise l'électricité et spécialement l'amateur radio qui joue avec ses ondes prévues par les équations de J. Clerk Maxwell. Si le lecteur aura pu progresser dans la compréhension du monde de l'électricité et de ses fameuses équations réputées très difficiles à aborder pour celui qui n'a pas l'appareil mathématique nécessaire, nous aurons atteint notre but. Mr Chevalier a prouvé ainsi une fois de plus que si l'on a une idée claire dans la tête, on peut l'exprimer clairement en utilisant les ressources de sa langue.

Note additive
La page de garde ainsi que les figures 1 à 5 ont été extraites de l'article de G. Chevalier cité dans la bibliographie.
Les figures 6 et 7 ont été empruntées à une publication intitulée «Technologie de mesure de précision pour la sécurité dans les champs électromagnétiques» de la firme Wandel & Goltermann. Ces figures très explicites indiquent très clairement la mise en évidence et la mesure des champs respectivement magnétiques et électriques. Elles contribueront grandement, du moins nous l'espérons à la compréhension de l'exposé.

Bibliographie

- Chevalier G., Maxwell ou les champs de la lumière, Les Cahiers de Science & Vie, hors serie, No 17, Octobre 1993.
- Quinet J., Theorie et pratique des circuits de l'électronique et des amplificateurs, Volume 3, Editeur Dunod, 1967.
- Hulin M., Perrin., Ondes électromagnétiques et équations de Maxwell, Editeur Dunod, 1993.
- Technologie de mesure de précision pour la sécurité dans les champs électromagnétiques, Wandel & Goltermann.

---

† SILENT KEY

Alfred Schultes, HB9ACZ

Am 29. Oktober 1997 wurde Fred aus diesem Leben abberufen. Er starb in seinen Ferien während einer Bootsfahrt vor Phuket/Thailand an einem Herzversagen.
Seit frühester Jugend befasste sich Fred mit Elektronik und Hochfrequenz. Seine Basteleien mit Empfängern und Sendern brachten ihn schon sehr früh zum Amateurfunk. Er erhielt damals das Rufzeichen DL3FV und war unter DL 3 Feuer-Vogel sehr aktiv und bekannt. Als Antennen wurden Drähte, Wäscheleinen und Dachrinnen angesaftet. So lernte er die Grundlagen des Improvisierens, von deren er sein Leben lang profitierte. Oft war er mit herkömmlichen Standards nicht zufrieden und suchte nach anderen, besseren Lösungen, bis er sie fand. Alles Neue reizte ihn; so machte er die Ausbildung zum Funkoffizier und war für die funktechnische Ausrüstung eines Forschungsschiffes für die Antarktis verantwortlich. Nur wegen einer akuten Mandelentzündung konnte er nicht anheuern und seine Sehnsucht in die Ferne fiel buchstäblich ins Wasser. Eine Anstellung bei der BBC in Baden liess ihn in die Schweiz übersiedeln. Er bekam das Rufzeichen HB9ACZ und war fortan aus der Schweiz QRV. Einige Jahre später zog er mit seiner Familie nach Lostorf. Seine Funkaktivitäten machten mich als SWL auf ihn aufmerksam und etwas später lernte ich ihn und seine Familie persönlich kennen. Immer, wenn ich kam, wurde ich von der gesamten Familie, einschliesslich Hund begrüsst. Beim gemeinsamen Bau und Testen der verschiedensten Antennen wuchs unsere Freundschaft. Neue Bauelemente wurden studiert und Schaltungen erprobt. Zu dieser Zeit legte auch ich meine Amateurfunkprüfung ab, für Fred nur halb, weil ohne CW. Trotzdem vertieften sich unsere gemeinsamen Interessen, zu denen auch die Meerwasseraquaristik gehörte. So sassen wir oftmals vor seinem gepflegten Becken mit den seltenen Blumentieren und Fischen, sprachen nicht nur über Funk und Technik, sondern auch über alle anderen Themen, die uns gerade beschäftigten. Dazu gehörten auch die Veränderungen am Arbeitsplatz und die wachsende Sorge für die weitere Zukunft. Die Beschäftigung mit seinen nunmehr fünf Enkelkindern und anderen Interessen liessen ihn immer seltener die Funkstation einschalten. So hörte man ihn nur noch sporadisch auf den Bändern, was nicht nur ich, sondern wohl auch seine vielen Funkfreunde sehr bedauerten. Wir alle, seine Familie und Freunde, trauern um Fred und werden ihn nie vergessen.

Walter Huster, DG3WH, ex HB9MKW