

# Hannes Alfvén (1908 - 1995): géophysicien, astrophysicien et cosmologiste

Michel Roth et Joseph Lemaire

Institut d'aéronomie spatiale de Belgique

Le mardi 4 avril 1995, les utilisateurs du réseau Internet abonnés au bulletin d'informations hebdomadaire de l'AGU (American Geophysical Union) recevaient un message laconique : «We are sorry to announce that Nobel Laureate Hans Alfvén passed away on Sunday, April 2, 1995.»



Hannes Alfvén

L'œuvre du physicien suédois Hannes Olof Gösta Alfvén a marqué profondément la physique des plasmas et la recherche spatiale. Avec les premiers travaux d'Alfvén, commence en effet l'ère moderne d'une branche alors récente de la physique : celle consacrée à l'espace et au cosmos. La plupart des étudiants en physique des plasmas découvrent probablement le nom d'Alfvén pour la première fois, alors qu'ils étudient la propagation des ondes dans les plasmas magnétisés. Ce n'est pas un hasard, car Alfvén acquiert une première notoriété dans le monde scientifique lorsqu'il découvre, au début des années quarante, les ondes hydromagnétiques qui portent son nom : les ondes d'Alfvén, qui résultent du couplage entre le champ magnétique et le plasma.

## Les ondes d'Alfvén

La découverte de ces ondes hydromagnétiques est le résultat de

l'intérêt poussé qu'Alfvén entretient, à l'époque, pour les taches solaires. À une époque où l'électromagnétisme et la dynamique des fluides sont considérés comme des domaines distincts de la physique, il propose un modèle de l'interaction mutuelle entre le champ électromagnétique et le plasma, ainsi que des ondes qui en résultent. Le mode alfvénique le plus simple est celui qui se propage le long des lignes de force du champ magnétique, avec une vitesse caractéristique, appelée *vitesse d'Alfvén* ( $V_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho_0}$ , où  $B_0$  est l'intensité du champ magnétique statique,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m est la perméabilité magnétique du vide et  $\rho_0$  la densité du plasma à l'équilibre). La vitesse d'Alfvén caractérise la propagation dans le plasma de certains types de perturbations du champ magnétique : celles pour lesquelles il n'y a pas de variation de la densité.

Un second mode alfvénique peut se propager perpendiculairement au champ magnétique : c'est un mode dit *magnétosonore rapide* (voir l'encadré : *les ondes magnétohydrodynamiques*). La vitesse de propagation de ce mode est supérieure à  $V_A$ , puisqu'elle est la somme pythagoricienne des carrés de la vitesse d'Alfvén et de la vitesse du son (d'où la terminologie «magnétosonore»).

Alfvén montre donc que la présence d'un champ magnétique dans un gaz ionisé modifie la vitesse des ondes acoustiques. En effet, lorsque  $B_0$  tend vers zéro,  $V_A$  s'annule et l'onde magnétosonore rapide se transforme en onde sonore ordinaire. En dynami-

que des plasmas, l'expression *vitesse d'Alfvén* est couramment utilisée. Elle est l'analogue de la *vitesse du son* en dynamique des gaz. Ainsi, alors que dans un gaz neutre on rencontre des écoulements subsoniques ou supersoniques, un plasma magnétisé sera plutôt caractérisé par des écoulements «subalfvéniques» ou «superalfvéniques».

## De faibles champs magnétiques...

Les activités scientifiques d'Alfvén couvrent un éventail incroyablement varié de domaines. En 1937, il imagine que la galaxie est envahie de champs magnétiques d'intensité certes modeste, mais néanmoins d'une grande importance astrophysique. Ces champs magnétiques sont engendrés par des courants électriques de faible intensité dans le milieu interstellaire. Cette idée, aujourd'hui unanimement reconnue, n'est cependant pas acceptée immédiatement par l'*establishment* scientifique de l'époque. Alors que la plupart de ses contemporains ignorent cette idée révolutionnaire, Alfvén l'utilise pour expliquer le bruit radio non thermique, d'origine galactique, que l'on détecte au niveau du sol. Pour Alfvén, ce bruit radio n'est rien d'autre que le résidu de la radiation synchrotron émise par les électrons relativistes s'enroulant en spirale autour du champ magnétique galactique dont il venait justement de proposer l'existence.

## La physique des plasmas pour expliquer les aurores et les queues cométaires

Alfvén s'intéresse très tôt aux phénomènes auroraux, à une époque où les travaux d'un autre grand précurseur de la physique des aurores, le physicien norvégien Kristian Birkeland, sont encore fort contestés. Dans une

## Les ondes magnétohydrodynamiques

Historiquement, une étape importante est franchie dans l'étude des ondes dans les plasmas magnétisés, lorsqu'Alfvén propose, en 1942, l'existence d'ondes magnétohydrodynamiques de basse fréquence (c'est-à-dire inférieure à la fréquence de Larmor des ions).

Ces ondes sont également appelées ondes hydromagnétiques. Elles se propagent à la manière de cordes vibrantes tendues par la tension magnétique et chargées par le plasma. La propagation des ondes électromagnétiques de basse fréquence dans un plasma magnétisé s'y fait avec entraînement transversal de la matière en phase avec le mouvement oscillant des «cordes vibrantes». Le cas le plus simple est celui d'ondes planes sinusoïdales se propageant dans un plasma homogène, parallèlement à un champ magnétique uniforme  $\vec{B}_0$ .

En considérant que le champ magnétique est «gelé» dans le plasma, on a les ondes transversales dont la structure est représentée sur la figure ci-contre. La vitesse de propagation de ces ondes est donnée par la formule classique des cordes vibrantes :  $V_A = \sqrt{T_M / \rho_0} = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho_0}$ , où  $T_M = B_0^2 / \mu_0$  est la tension magnétique et  $\rho_0$  la densité du plasma. La vitesse de propagation  $v_A$  est la vitesse d'Alfvén ; elle est indépendante de la fréquence et de la vitesse du son.

Ces ondes transversales peuvent également se propager à une vitesse  $V_A \cos \theta$ , dans une direction inclinée d'un angle  $\theta$  avec le champ magnétique  $\vec{B}_0$ . Cette branche d'oscillations magnétohydrodynamiques est appe-

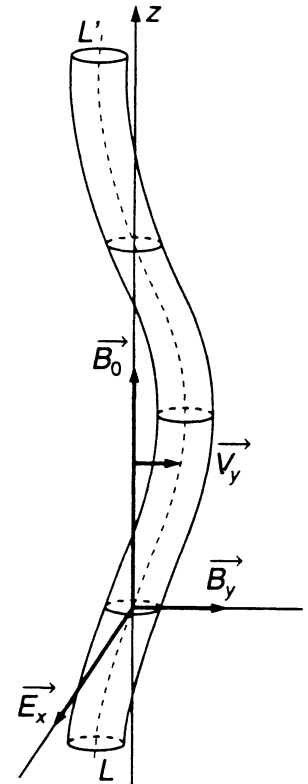
lée onde d'Alfvén. L'onde d'Alfvén, comme l'onde sonore, se propage sans dispersion dans le domaine des basses fréquences, c'est-à-dire que sa vitesse de propagation ne dépend pas de la longueur d'onde. Contrairement à l'onde sonore, l'onde d'Alfvén n'est cependant pas liée à une variation de la densité du milieu.

Dans un plasma magnétisé, les ondes sonores subissent une modification. Il y apparaît deux branches d'ondes magnétosonores qui ont des vitesses différentes. Celles-ci dépendent de l'intensité du champ magnétique appliqué :

$$v_{\pm}^2 = \frac{1}{2} \left\{ v_s^2 + V_A^2 \pm \sqrt{(v_s^2 + V_A^2)^2 - 4v_s^2 V_A^2 \cos^2 \theta} \right\}$$

où  $v_s$  est la vitesse du son ( $v_s = \sqrt{\gamma P_0 / \rho_0}$ ,  $\gamma$  étant le rapport des chaleurs spécifiques,  $P_0$  et  $\rho_0$  la pression cinétique et la densité du plasma à l'équilibre). L'onde ayant la vitesse de phase  $v_+$  est dite magnétosonore rapide et l'onde de vitesse de phase  $v_-$  est magnétosonore lente. Lorsque  $\vec{B}_0 = \vec{0}$ , on a  $V_A = 0$  et l'onde magnétosonore rapide se transforme en onde sonore ordinaire ( $v_+ = v_s$ ), alors que l'onde magnétosonore lente disparaît ( $v_- = 0$ ). Contrairement à l'onde d'Alfvén, les ondes magnétosonores sont associées à une variation de la pression et de la densité du plasma. Pour une propagation perpendiculaire au champ magnétique ( $\theta = 90^\circ$ ), seule l'onde magnétosonore rapide subsiste. Dans ce cas,  $v_- = 0$  et  $v_+ = \sqrt{v_s^2 + V_A^2}$ . Pour une propagation parallèle au champ magnétique ( $\theta = 0^\circ$ ), on trouve un mode acoustique purement longitudinal ( $v_- = v_s$ ) et un mode transversal, distinct de l'onde d'Alfvén bien que se propageant à la vitesse  $v_+ = V_A$ .

L'onde d'Alfvén et les deux ondes magnétosonores sont les trois modes basse fréquence formant ce qu'on appelle les ondes magnétohydrodynamiques.



L'onde d'Alfvén la plus simple se propage parallèlement au champ statique  $\vec{B}_0$ . Elle peut être décrite en considérant les tubes de force comme des cordes vibrantes tendues par la tension magnétique. L'onde d'Alfvén est transversale, puisque les composantes oscillantes du champ électrique ( $\vec{E}_x$ ) et du champ magnétique ( $\vec{B}_y$ ) liées à l'onde plane sont dans le plan normal à la direction de propagation. Le plasma gelé dans le tube de force  $LL'$  oscille avec lui dans la direction  $y$ , avec la vitesse  $V_y$ .

série d'expériences célèbres, effectuées au tournant du siècle dernier, Birkeland avait tenté de créer les premières aurores artificielles, en laboratoire. Il en avait déduit que les aurores sont le résultat d'un bombardement d'électrons, en provenance du Soleil. Une des raisons pour lesquelles les

théories de Birkeland ne sont pas encore reconnues à l'époque où Alfvén s'y intéresse est basée sur le raisonnement suivant : si le Soleil émet des électrons, il doit se charger positivement ; ces charges positives, à leur tour, empêchent les électrons de s'échapper ; l'émission d'électrons en

provenance du Soleil doit donc s'arrêter et avec elle la formation d'aurores. Alfvén postule alors, vers 1950, que le courant de particules en provenance du Soleil est globalement neutre, c'est-à-dire que le Soleil émet simultanément un nombre égal de particules chargées négativement (électrons) et

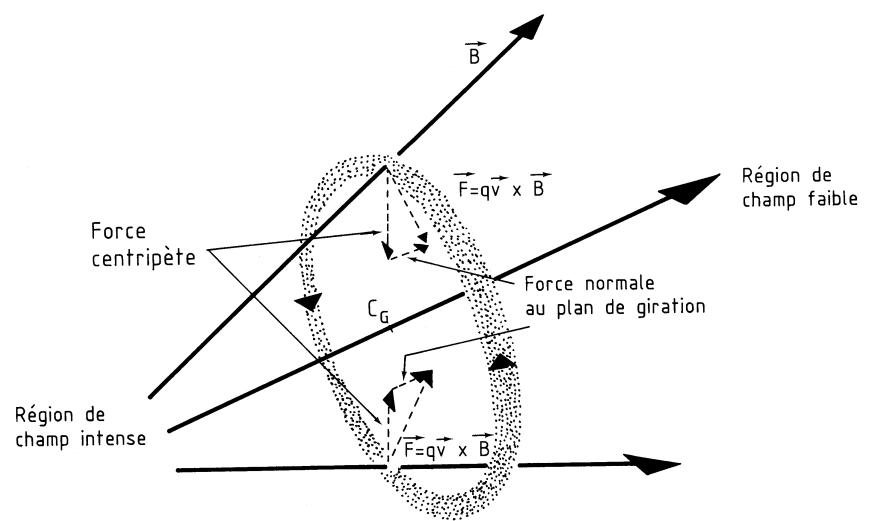
de particules chargées positivement (protons). De plus, puisque ces particules chargées se déplacent dans le champ magnétique interplanétaire  $\mathbf{B}$ , avec une vitesse  $\mathbf{V}$  (c'est-à-dire la vitesse du *vent solaire*, que Biermann découvrit plus tard, en 1951), Alfvén propose aussi l'existence d'un champ électrique interplanétaire  $\mathbf{E}$ , perpendiculaire au champ magnétique, et dont l'intensité est donnée par  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ .

Alors que ses idées sur l'existence de champs électriques perpendiculaires aux champs magnétiques font encore l'objet de vives polémiques, Alfvén développe le concept de *doubles couches électrostatiques*, régions où règnent d'intenses champs électriques, parallèles au champ magnétique de l'espace. On attribue aujourd'hui la formation des aurores aux faisceaux d'électrons accélérés au sein de ces doubles couches électrostatiques. Alfvén souligne également l'importance de ces doubles couches en astrophysique.

Dans un tout autre domaine, il est le premier à proposer une théorie de la formation des queues cométaires, dans le cadre de la physique des plasmas. Les récentes missions spatiales de survol des comètes (Giacobini-Zinner, Halley) ont confirmé sa théorie.

## La magnétohydrodynamique

Alfvén invente également un certain nombre de concepts simples avec l'aide desquels, aujourd'hui encore, on enseigne la physique des plasmas. Au début du siècle, celle-ci était toujours appelée *physique des gaz ionisés*. En 1939, Alfvén introduit la notion de *centre guide* pour décrire le mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et définit le *premier invariant adiabatique* ainsi que le concept de *lignes de champ «gelées au sein du plasma»*. Ce concept, en particulier, introduit une nouvelle image physique dans la description des milieux ionisés qui rencontre d'emblée beaucoup de succès, car elle simplifie l'effort de représentation intellectuelle dans un domaine par ailleurs dominé par des mathématiques complexes. Cette approximation constitue la base de la magnétohydrodynamique. Malheureusement, cette image des li-



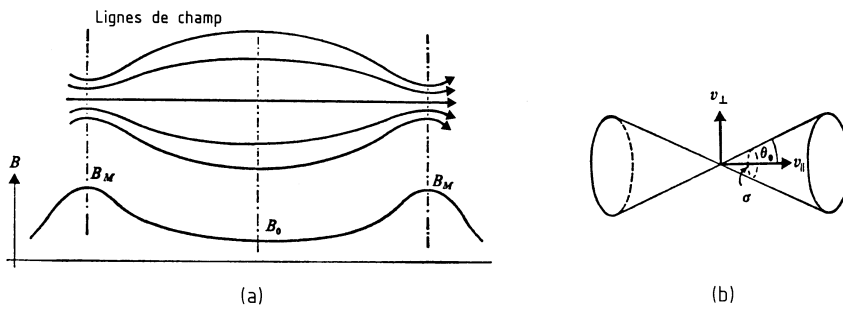
Forces agissant sur une particule chargée en giration dans un champ magnétique divergent. Dans l'approximation du centre guide, la trajectoire de la particule peut être décomposée en un mouvement de giration autour d'une ligne de champ passant par le centre guide  $C_G$  et en un mouvement de ce centre guide le long et au travers des lignes de champ. Cependant, dans le cas de la géométrie illustrée ici, le centre guide glisse le long des lignes de force, sans les traverser. La figure illustre le mouvement élémentaire de giration de Larmor, lorsqu'on projette la trajectoire dans un plan normal à la ligne de champ passant par le centre guide. La force de Lorentz  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , agissant perpendiculairement à  $\mathbf{B}$ , ne se trouve pas dans ce plan à cause de la divergence des lignes de champ du côté où l'intensité de  $\mathbf{B}$  diminue. En tout point de la trajectoire, il existe une composante de la force de Lorentz, normale au plan de giration, et dirigée du côté où le champ magnétique diverge (ceci est vrai quels que soient le signe de la charge et l'orientation du champ magnétique). C'est pourquoi, lorsque le centre guide se déplace dans la région où le champ magnétique converge (à gauche sur la figure), cette composante a pour effet de ralentir ce déplacement. Si la force en question est suffisamment intense et agit assez longtemps, la particule chargée peut rebrousser chemin le long des lignes de champ, en un point appelé «point miroir». De plus, la quantité  $(1/2)mv_{\perp}^2 / B$  reste approximativement constante. C'est le premier invariant adiabatique introduit par Alfvén. Il est égal au rapport entre l'énergie cinétique perpendiculaire (liée à la giration) et l'intensité du champ magnétique. On peut montrer qu'il est équivalent au moment magnétique de la particule, c'est-à-dire au moment magnétique du petit aimant produit par le courant électrique élémentaire de la charge en mouvement circulaire autour des lignes de champ.

gnes du champ magnétique «entraînées» par le plasma en mouvement, illustration du concept de lignes de champ «gelées», sera utilisée à outrance, et parfois à mauvais escient, par d'aucuns afin de décrire des phénomènes physiques pour lesquels l'approximation magnétohydrodynamique cesse d'être valable. Alfvén, lui-même, sera conscient du mauvais usage que l'on fait du concept de champ gelé, et regrettera par la suite d'avoir en quelque sorte introduit un concept trop réducteur. Pour tenter de remédier à cette situation, il écrit, en 1976, un article de mise en garde, dans lequel il montre les limites d'application de la «magnétohydrodynamique idéale».

## Naissance de la physique magnétosphérique

Par contre, les nouveaux outils que présentent les notions de centre guide

et d'invariant adiabatique jettent des bases solides pour l'étude du mouvement des particules chargées de haute énergie dans des champs magnétiques non uniformes et en particulier dans le champ géomagnétique. Ainsi, à la fin des années quarante, Alfvén démontre l'existence du *courant électrique annulaire* entourant la Terre, dont l'intensification est responsable de la phase principale des orages magnétiques (voir l'article de M. Roth dans *Ciel et Terre*, Vol. 105, n° 2, 31-37, 1989). Il propose également la présence d'une ceinture de particules chargées de haute énergie autour des planètes possédant un champ magnétique intrinsèque, comme la Terre. Il pose en même temps les bases et les principes physiques gouvernant la structure des *ceintures de radiation* de Van Allen, une dizaine d'années avant la découverte de celles-ci. Le premier invariant adiabatique d'Alfvén est



(a) Configuration du champ magnétique dans une bouteille magnétique. À cause de l'invariance du moment magnétique, l'énergie cinétique perpendiculaire d'une particule chargée ( $W_{\perp}$ ) augmente dès lors que cette particule pénètre dans une région de champ magnétique convergent, comme celle qui existe aux deux extrémités de la configuration magnétique illustrée sur cette figure. Comme l'énergie cinétique totale d'une particule chargée soumise à la seule action d'un champ magnétique est également conservée ( $W = W_{\perp} + W_{\parallel} = \text{Const.}$ ), l'augmentation éventuelle de  $W_{\perp}$  doit se faire au détriment de  $W_{\parallel}$ , l'énergie cinétique parallèle. Il se peut dès lors que, pour une certaine valeur de  $B$ ,  $W_{\parallel} = 0$ , auquel cas la particule chargée ne peut pénétrer davantage dans la région de champ magnétique convergent. Elle subit une réflexion à cet endroit, qui est donc un *point miroir*. La configuration magnétique illustrée ici représente une bouteille magnétique, à l'intérieur de laquelle la particule est en quelque sorte piégée et où elle exécute un mouvement perpétuel de va-et-vient entre deux points miroirs symétriques.

(b) L'angle d'attaque  $\theta$  est l'angle que fait la vitesse de la particule avec la direction du champ magnétique. Il existe une valeur critique  $\theta_0$  de l'angle d'attaque au centre de la bouteille magnétique, définie par  $\sin\theta_0 = (B_0 / B_M)^{1/2}$ . En effet, on montre que, si  $\theta < \theta_0$ , les particules ne sont pas piégées et s'échappent de la bouteille magnétique par ses extrémités. La vitesse de ces particules se trouve à l'intérieur d'un «cône de perte» défini par l'angle solide  $\sigma$ .

l'équivalent d'un moment dipolaire magnétique. Grâce à cet outil et au concept de centre guide, l'analyse des trajectoires extrêmement compliquées qu'une particule chargée décrit dans un champ magnétique non uniforme peut être grandement simplifiée, en considérant le dipôle magnétique produit par le courant électrique élémentaire de la charge en mouvement circulaire autour des lignes de champ. Lorsqu'on découple ce mouvement de rotation, le mouvement résiduel de la particule chargée est alors équivalent à celui d'un aimant élémentaire dont la trajectoire est celle du centre guide. Grâce aux travaux d'Alfvén, d'importants progrès sont accomplis dans l'étude des trajectoires d'une particule chargée dans le champ géomagnétique. Sous l'impulsion de Birkeland, cette étude avait été commencée par Störmer dès 1904 et poursuivie avec succès par Lemaître et Vallarta, une trentaine d'années plus tard (voir l'article de L. Bossy dans *Ciel et Terre*, Vol. 110, n° 4, 117-118, 1994). Par rapport à ces illustres prédécesseurs, l'approche d'Alfvén simplifie l'analyse des trajectoires voisines du dipôle terrestre et lui permet de prédire la ceinture de particules chargées encerclant la

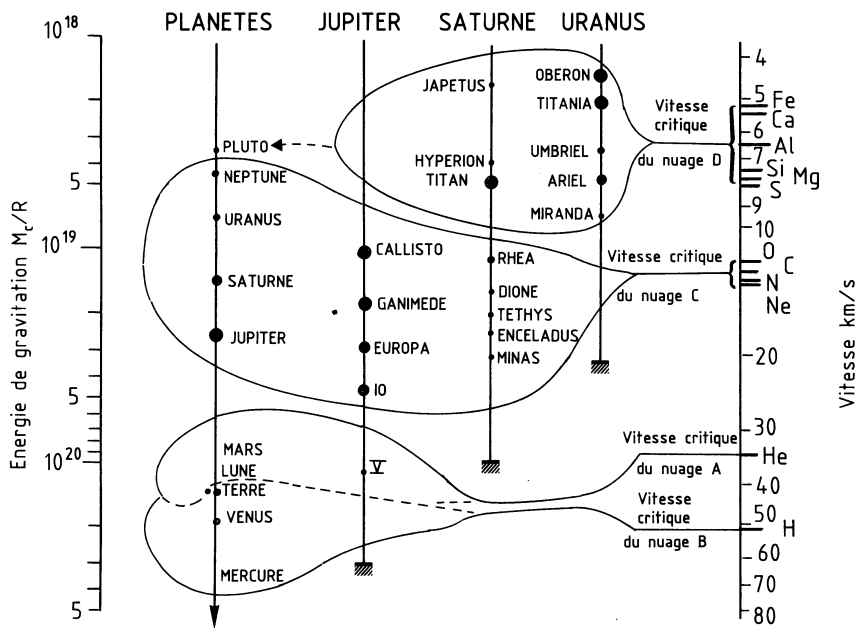
Terre et piégées dans le champ géomagnétique. Au laboratoire, l'invariance du moment magnétique est la base du principe des *miroirs magnétiques* utilisés pour piéger des particules chargées en vue de produire la fusion thermonucléaire.

Les idées d'Alfvén sont rarement acceptées d'emblée par ses contemporains. Ainsi, en 1939, il écrit un article remarquable dans lequel il propose une théorie des tempêtes magnétiques et des aurores. Cet article est rejeté par la prestigieuse revue *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* (actuellement : *Journal of Geophysical Research*), car il contredit les théories de Sydney Chapman. Alfvén est alors obligé de publier ce travail, ainsi que d'autres parmi ses premières contributions importantes, dans des revues de moindre notoriété internationale, comme *Kungliga Svenka Vetenskapsakademiens Handlingar*, c'est-à-dire les comptes rendus de l'Académie royale suédoise des sciences. Néanmoins, Alfvén parvient à présenter ses travaux à la communauté scientifique internationale dans un livre intitulé *Cosmical Electrodynamics*, qu'il a écrit en collaboration avec Carl-Gunne Fälthammar et qui est publié par Ox-

ford University Press en 1950. Alfvén reste cependant *persona non grata* auprès de la communauté scientifique et en particulier de la puissante *American Geophysical Union* (AGU), qui ne retient pas sa candidature, en 1969, lors de l'attribution du *Fleming Award* pour ses contributions fondamentales à la science de la magnétosphère. Moins d'un an plus tard, cependant, en 1970, il reçoit le prix Nobel de physique pour ces mêmes contributions.

### La vitesse critique d'ionisation et la formation du système solaire

Cependant, Alfvén est un battant et il ne se repose donc pas sur ses lauriers. Son intérêt se porte maintenant vers l'astrophysique. Son style n'a pas changé et il s'attaque alors à quelques piliers fondamentaux âprement défendus par l'*establishment* en astrophysique. En planétologie, il défend l'idée que la physique des plasmas joue un rôle central dans la formation des planètes : un rôle aussi important que celui joué par la gravité. Parmi ses nombreux nouveaux concepts, il introduit notamment celui de *vitesse critique d'ionisation*,  $v_c$ , définie par  $mv_c^2 / 2 = eV_{ion}$ , où  $m$  est la masse d'un atome neutre, et  $eV_{ion}$  l'énergie d'ionisation de celui-ci. Lorsque cette vitesse critique est atteinte, l'énergie cinétique devient donc égale à l'énergie d'ionisation. Alfvén postule alors qu'un gaz neutre, tombant sous l'effet de la gravité exercée par un corps central, devient ionisé lorsque la vitesse de chute atteint  $v_c$ . En présence d'un champ magnétique, les ions nouvellement formés sont soumis à d'importantes forces électromagnétiques qui contre-carrent l'action de la gravité. Pour Alfvén, la vitesse critique d'ionisation joue un rôle essentiel dans la formation du système solaire. Ce concept simple, mais révolutionnaire, est à nouveau négligé par ses contemporains, car la théorie classique ne prévoyait aucun effet significatif lorsque  $v_c$  était atteinte. Néanmoins, des expériences de laboratoire menées par Block et Fahleson, dans le cadre de la fusion thermonucléaire, montreront qu'une interaction très forte est observée, lorsque la vitesse relative entre un gaz neutre et un plasma magnétisé dépasse  $v_c$ . Comme l'écrit Alfvén dans



D'après Alfvén, un gaz en chute libre autour d'un corps central s'ionise et interagit fortement avec le champ magnétique ambiant, dès que sa vitesse de chute atteint la vitesse critique d'ionisation. La chute s'arrête à une distance  $R$  du corps central, au moment où l'énergie gravitationnelle d'un atome du gaz devient égale à l'énergie cinétique correspondant à la vitesse critique d'ionisation :  $GmM_c/R = mv_c^2/2$  ( $G$  est la constante de la gravitation universelle ;  $m$  la masse atomique ;  $M_c$  la masse du corps central ; et  $V_c$  la vitesse critique d'ionisation). Les forces électromagnétiques transfèrent une partie du moment angulaire du corps central au gaz qui s'est accumulé à une distance  $R$ , et ce nuage de gaz donnera ultérieurement naissance à un groupe de satellites, situé *grosso modo* à cette même distance. Sur cette figure, on a relevé le potentiel gravitationnel des planètes et des satellites  $M_c/R$  (échelle de gauche, où  $R$  désigne ici le rayon de l'orbite de la planète ou du satellite). L'échelle de droite traduit la vitesse critique  $v_c = (2GM_c/R)^{1/2}$  correspondant à l'échelle de gauche. Sur l'échelle de droite, on trouve également la vitesse critique d'ionisation d'un certain nombre d'éléments chimiques. Celle-ci est définie par la relation :  $mv_c^2/2 = eV_{ion}$  ( $e$  est la charge électronique et  $V_{ion}$  est le potentiel d'ionisation de l'élément). On voit qu'à partir du concept de vitesse critique d'ionisation, il est possible de rendre compte de la position des planètes et des satellites (d'après Alfvén and Wilcox, *Astrophys. J.*, Vol. 136, 1016, 1962).

son livre *Cosmic Plasma* (p. 118), la vitesse critique d'ionisation est le seul phénomène physique découvert en laboratoire après avoir été prédit par une théorie de la formation du système solaire.

En se basant sur cette théorie, développée par Alfvén, l'astrophysicien Bibhas De prédit, en 1972, la formation d'un anneau autour d'Uranus et tente de publier, dans une célèbre revue scientifique, un article intitulé : *On the Possibility of Existence of a Ring of Uranus*. Cet article est rejeté d'emblée car, à l'époque, le concept de vitesse critique d'Alfvén est loin de faire l'unanimité. Cependant, le 10 mars 1977, au cours d'une occultation d'une étoile de neuvième magnitude par la planète Uranus, au moins cinq anneaux sont observés autour de cette dernière par différents groupes d'astronomes. De fait, cinq anneaux ont signalé leur présence par cinq brèves occultations de l'étoile, à la fois avant et après l'occultation principale par la planète. Au cours des mêmes observations, les astronomes indiens Bhattacharyya et Kuppaswamyun détectent également un nouveau satellite d'Uranus, à une distance orbitale d'environ 53 000 km. La même revue scientifique reconsidère alors l'article que Bibhas De avait soumis cinq ans

auparavant. Cet article, datant de 1972, est à nouveau rejeté. Il sera néanmoins accepté par la revue *The Moon and The Planets* et publié tel quel en 1978 sous un nouveau titre : *A 1972 Prediction of Uranian Rings Based on the Alfvén Critical Velocity Effect*.

### La structure cellulaire de l'espace

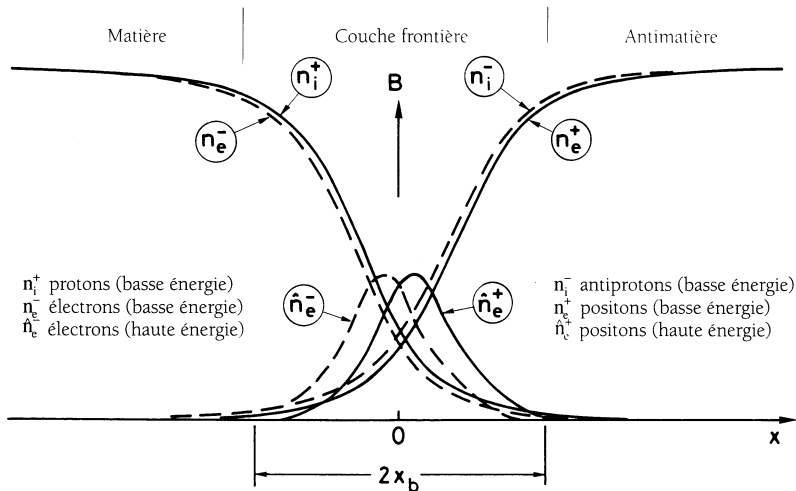
En cosmologie, Alfvén considère la théorie de la formation de l'Univers, basée sur le modèle du Big-Bang, comme un mythe. Pour Alfvén, la matière et l'antimatière doivent être présentes dans l'Univers en quantités approximativement égales. La découverte que les plasmas de l'espace explorés par les sondes spatiales sont en quelque sorte compartimentés et que les frontières entre deux compartiments adjacents sont des feuillets de courant électrique (par exemple la magnétopause qui sépare le plasma du vent solaire de celui d'origine ionosphérique confiné par le champ géomagnétique), conduit Alfvén à suggérer une structure cellulaire des plasmas dans l'Univers. À l'échelle du cosmos, l'espace serait divisé en nombreuses régions distinctes contenant des plasmas de densités, températures, compositions ioniques et magnétisations différentes, et contenant peut-être aussi différents types de matière («koinomatière»<sup>1</sup> et antimatière). Le chapitre VI de son livre *Cosmic*

*Plasma* est entièrement consacré aux conséquences cosmologiques de cette hypothèse.

### Un parcours hors du commun

Alfvén est né le 30 mai 1908 à Norrköping, en Suède, et grandit dans un environnement intellectuel de qualité. Sa mère figure parmi les premières femmes suédoises qui accèdent à la profession de médecin. Son père, également médecin, montre un intérêt poussé pour les sciences. Un de ses oncles, Hugo Alfvén, est un compositeur de talent ; un autre est inventeur et un troisième, agronome de profession, est passionné d'astronomie et ses idées sur les problèmes liés à l'environnement, que l'on redécouvrira à notre époque, sont bien en avance sur celles de ses contemporains. Selon les propres dires d'Alfvén, deux épisodes de sa jeunesse, partagés entre la maison familiale et l'école, ont une influence considérable sur son développement intellectuel et sur sa carrière scientifique. Le premier est la remise d'un cadeau : *L'Astronomie populaire* de Camille Flammarion, livre qu'il lira avec passion et qui suscitera chez lui un intérêt vif pour l'astronomie et l'astrophysique ; une passion qui l'accompagnera sa vie durant. L'autre épisode est sa participation à un club de radioamateurs. Au sein de ce club, le jeune Alfvén apprend comment cons-

<sup>1</sup> du grec *koino*, ordinaire



Certaines idées d'Alfvén restent controversées. C'est par exemple le cas de ses conceptions en matière de cosmologie. Alfvén est un partisan de la *cosmologie symétrique*, introduite par Oscar Klein. Cela implique que l'Univers est constitué, en quantités égales, de plasma et d'antiplasma, séparés par de minces couches frontières au sein desquelles se déroulent d'intenses processus d'annihilation. À cause des densités extrêmement faibles et de l'étroitesse de ces couches frontières, la radiation résultante serait trop faible pour pouvoir être détectée à la surface terrestre. Ces couches de transition sont analogues aux couches dites de *Leidenfrost*. Le phénomène Leidenfrost est bien connu en physique classique : lorsqu'une goutte d'eau est déposée à la surface d'une plaque dont la température dépasse largement 100 °C, la goutte ne s'évapore pas immédiatement, mais subsiste pendant cinq à dix minutes. L'évaporation de l'eau produit une mince couche de vapeur qui isole l'eau de la plaque chauffante. La structure d'une couche de Leidenfrost, séparant un antiplasma (à droite) d'un plasma ordinaire (à gauche) est illustrée ci-dessus (d'après Lehnert, *Astrophys. Space Sci.*, Vol. 46, 61, 1977).

truire des récepteurs radio et découvrir la fascination de l'inventeur lorsqu'il parvient à capter, sur un récepteur de sa fabrication, quelques faibles notes de musique émergeant du bruit atmosphérique et qu'il attribue à la station de radiodiffusion la plus proche, celle d'Aberdeen en Ecosse. Alfvén étudie ensuite à l'Université d'Uppsala de 1926 à 1934, année au cours de laquelle il obtient le titre de Docteur ès sciences. Sa thèse de doctorat, intitulée « Ondes électromagnétiques ultracourtes », est, de l'aveu même d'Alfvén, la continuation de ses activités de radioamateur. À partir de 1934, il enseigne la physique à l'Université d'Uppsala et, plus tard, à l'Institut Nobel de physique à Stockholm. Manne Siegbahn, le superviseur de sa

thèse à l'Université d'Uppsala et prix Nobel de physique en 1924 pour ses recherches dans le domaine de la spectroscopie par rayons X, est le premier directeur de ce récent établissement de recherches nucléaires. À Stockholm, Hannes Alfvén assiste régulièrement aux séminaires d'Oscar Klein, à l'université. Ces séminaires, qu'il trouve passionnants abordent des sujets extrêmement variés, entre autres la cosmologie, une science qui prendra une place importante dans la carrière d'Alfvén. Ses activités à l'Institut Nobel de physique l'amènent à étudier l'accélération de particules chargées jusqu'à des énergies particulièrement élevées, de l'ordre de celles que peuvent atteindre les rayons cosmiques. D'ailleurs, en 1933, il avait déjà publié, dans la revue *Nature*, une théorie de l'origine de la radiation cosmique, qui avait été remarquée par Arthur Compton.

En 1940, Alfvén devient Professeur d'électromagnétisme dans un établissement de haute réputation : l'Institut royal de technologie, à Stockholm. En

1945, il obtient également la chaire du tout nouveau département d'Électronique. Celui-ci deviendra, en 1963, le département de Physique des plasmas. À l'Institut royal de technologie, la forte activité scientifique d'Alfvén conduit à la création de nouvelles chaires et de nouveaux départements au sein de l'École d'électrotechnique. Les départements de Physique des plasmas, de Physique de la fusion et de Technologie des accélérateurs naissent ainsi des activités d'Alfvén. Ces trois départements formeront, à partir de 1990, une entité séparée au sein de l'Institut royal de technologie : le *Laboratoire Alfvén*, créé en hommage à son œuvre.

En 1967, Alfvén accepte l'invitation de Gustaf Arrhenius de le rejoindre à l'Université de Californie de San Diego, à La Jolla. Il partage alors ses activités entre l'Europe et les États-Unis. À partir de 1988, il résidera de façon permanente en Suède.

### De nombreuses distinctions honorifiques

Quand Alfvén reçoit son prix Nobel en 1970, c'est la première fois qu'un lauréat est couronné pour des travaux qui relèvent (entre autres) de l'astrophysique<sup>2</sup>. Alfvén est détenteur de nombreuses distinctions honorifiques, parmi lesquelles la médaille d'or de la *Royal Astronomical Society* (1967), la médaille d'or de l'Institut Franklin en 1971, la médaille Lomonosov de l'Académie des sciences de l'ex-URSS (également en 1971), la médaille Bowie de l'AGU, laquelle reconnaîtra finalement ses mérites en lui accordant cette distinction en 1988, et la médaille Dirac en 1994. Alfvén est également l'un des très rares scientifiques, membres étrangers, à la fois de l'Académie des sciences des États-Unis et de l'Académie des sciences de l'ex-URSS.

En 1984, Joseph Lemaire, alors vice-président de la Société européenne de géophysique (EGS), propose le Professeur Hannes Alfvén comme Membre honoraire de cette organisation internationale, fondée en 1971. C'est lors de l'assemblée générale de l'EGS qui se tient à Uppsala, précisément dans la ville où Alfvén avait fait ses études

voir suite page 74

<sup>2</sup> La géophysique fut couronnée à trois reprises avant lui : Marconi et Braun en 1909 pour leurs contributions à la télégraphie sans fil ; Hess en 1936 pour sa découverte du rayonnement cosmique ; et Appleton en 1947 pour ses travaux sur l'ionosphère.

## Le Théorème de Complexité sociologique<sup>3</sup>

Un examen détaillé de ce théorème ainsi que sa démonstration nous mèneraient au-delà des objectifs de cette étude ; cependant, cette question est tellement importante qu'il est utile d'en rappeler les bases. Nous pouvons prendre comme comparaison le fait qu'à l'époque antérieure aux ordinateurs il était impossible de faire des prévisions météorologiques de manière fiable et précise. Nous savons que, si à un instant déterminé, des observations sont faites en un nombre suffisant de stations météorologiques, il devient possible de prédire le temps pour une période dont la durée maximale n'excède pas trois jours. Il suffit en principe de résoudre un ensemble d'équations différentielles.

Mais, pour résoudre numériquement ces équations et effectuer les calculs nécessaires sans l'aide d'un ordinateur, il faut plus de trois jours ; de telle sorte que lorsque la prévision sera réalisée, les trois jours seront déjà écoulés. Ce n'est qu'avec l'avènement des ordinateurs qu'il a été possible de réaliser des prévisions suffisamment rapidement et, dès lors, de donner une certaine utilité à ces prévisions.

Le problème sociologique est, d'une certaine façon, similaire à celui des prévisions météorologiques. Ce n'est qu'après une étude complète des conditions sociales actuelles que l'on peut s'engager à organiser la société de manière rationnelle pour l'avenir. Mais cela prend un temps très long pour saisir tous les éléments des structures sociales, qui sont très complexes. Si une communauté de personnes ne subit aucune évolution et reste figée de manière statique, on a alors tout le loisir d'étudier les caractéristiques essentielles de celle-ci, de décider quelles mesures il faut prendre et d'adapter celles-ci en temps utile, tout en contrôlant leurs résultats sur le système.

Mais un tel procédé demande du temps : un temps incomparablement

plus long que celui qui est nécessaire pour faire des prévisions météorologiques. Ceci implique que l'on ne peut appliquer de telles méthodes, valables dans le cas d'une société statique dont les caractéristiques ne varient pas au cours du temps, au cas d'une société qui évolue de par son développement technologique. En effet, lorsque le temps nécessaire à étudier cette communauté sera écoulé, lorsque les mesures à prendre seront déterminées et leur mise en œuvre acceptée, la science aura permis de faire de nouvelles découvertes et la technologie aura déjà apporté de nouvelles inventions.

En conséquence, au moment où les innovations proposées commenceront à prendre effet, elles seront déjà dépassées. L'environnement social peut, entre-temps, avoir subi des modifications importantes, qui demandent que l'on prenne des mesures diamétralement opposées. Dès lors, les mesures effectivement adoptées ne conduiront pas, en général, à une organisation sociale plus rationnelle, mais auront l'effet contraire en y augmentant le chaos. Avant que de nouvelles mesures tenant compte de la nouvelle situation aient pu être établies, la science et la technologie auront fait tomber celles-ci en désuétude.

C'est pour cette raison que les prévisions sociologiques durant l'ère pré-informatique étaient toutes fausses et que les dirigeants de ces communautés étaient perpétuellement en train de tourner en rond.

Le Théorème de Complexité sociologique est né d'une analyse des nombreux facteurs dont il faut tenir compte si l'on veut organiser une société et de la rapidité avec laquelle ceux-ci se modifient. La capacité du cerveau humain était confrontée aux données complexes à prendre en considération et fut rapidement dépassée. Théoriquement, ce problème aurait pu être résolu. En effet, un grand nombre de cerveaux travaillant ensemble aurait pu fonctionner suffisamment vite, pour autant que les cerveaux individuels aient été organisés

pour collaborer de manière efficace. Mais, à cette époque, la coopération entre des individus n'aurait jamais pu atteindre un tel degré d'efficacité, car la communication verbale ou écrite était lente et maladroite. Plus la taille de l'organisation était grande, moins elle était efficace. En conséquence, aucune organisation composée d'un nombre élevé ou négligeable d'êtres humains ne posséda la capacité intellectuelle pour analyser et assimiler suffisamment vite tous les changements survenant dans une société complexe et en perpétuelle évolution.

Une analyse en profondeur du problème décrit ci-dessus conduisit à la conclusion que *le problème d'organisation d'une société est tellement complexe qu'il est impossible qu'un cerveau humain puisse le résoudre, ni même plusieurs cerveaux travaillant en collaboration*. C'est cette conclusion qui est connue sous le nom de Théorème de Complexité sociologique. La preuve mathématique de ce théorème est l'un des exploits scientifiques les plus remarquables de l'âge symbiotique.

Nous savons maintenant avec certitude qu'aucune société stable ne pouvait être construite pendant l'ère pré-informatique. Des idéalistes et des réformateurs sociaux ont essayé de résoudre un problème qui, par sa nature même, était insoluble.

Toute tentative de construire une machine volante avant l'invention d'un moteur à combustion interne fut condamnée à l'échec : les muscles humains étaient trop faibles pour faire décoller l'homme et celui-ci ne put voler qu'avec l'aide d'un moteur. Par analogie, sa capacité intellectuelle était inadaptée à la tâche de construire une société stable et ce n'est que lorsque les ordinateurs furent disponibles que cette tâche si difficile put être menée à bien. L'avènement des ordinateurs a donc été une condition de base à la création d'une société stable ; ce qui implique une société débarrassée de la peur d'un désastre hypothétique. C'est pour cette raison également que l'apparition des ordinateurs marque le début d'un nouvel âge.

<sup>3</sup> Traduction d'un extrait du livre *The Great Computer : A Vision*, d'Olof Johannesson (pseudonyme d'Hannes Alfvén), version anglaise par John Wilcox (alias Naomi Walford) publiée chez Victor Gollancz Ltd., 1968.

universitaires et où il avait obtenu son titre de Docteur ès sciences, que ce pionnier de la physique des plasmas et ce géant de la recherche spatiale devient le premier Membre honoraire de l'EGS. Il visite l'Institut d'aéronomie spatiale de Belgique en 1985, à l'occasion d'une conférence qu'il donnera au Palais des académies de Bruxelles, à l'invitation du Centre national de recherches spatiales (CNRS).

### Un auteur de science-fiction

Lors d'une visite à l'Université de San Diego, à La Jolla, le 22 janvier 1982, Joseph Lemaire se voit offrir par Alfvén un petit livre d'une centaine de pages intitulé : *The Great Computer : A Vision* d'Olof Johannesson. Ce livre est étonnant et passionnant à la fois. C'est un essai du genre «Le meilleur des Mondes» de A. Huxley, mais centré sur le monde de l'informatique et des communications électroniques (voir l'encadré : *le Théorème de Complexité sociologique*). Ce livre de science-fiction a été écrit par Hannes Alfvén lui-même, sous le pseudonyme d'*Olof Johannesson* (Hannes Alfvén était le fils de Johannes Alfvén) et a été traduit en anglais par le géophysicien John Wilcox (sous le pseudonyme de *Naomi Walford*). Dans le premier chapitre, Alfvén décrit, de manière imagée, la préhistoire et l'évolution des ordinateurs depuis leur invention jusqu'en 1966, date à laquelle la version suédoise de ce livre est imprimée chez Albert Bonniers förlag AB. Dans les

chapitres suivants, il nous montre une vision de l'avenir prédisant la miniaturisation des ordinateurs, leur interconnexion planétaire et le rôle de plus en plus envahissant qu'ils vont prendre dans notre société et dans la vie journalière de tous les humains. On est frappé de constater, près de trente ans après la publication de ce livre, combien les visions d'Alfvén étaient pertinentes et percutantes. Malgré une certaine exagération dans ses propos, certaines de ses «prévisions» sont actuellement en train de se concrétiser, dans un domaine où les télécommunications par satellites artificiels sont devenues banales et à l'heure où l'on nous annonce les «autoroutes de l'information». Il est intéressant aujourd'hui de relire ce petit livre qui se termine de manière assez apocalyptique dans les chapitres III et IV. Ce livre a été traduit dans une dizaine de langues différentes. Une deuxième traduction anglaise de ce livre a été commercialisée sous le titre *The Tale of the Big Computer* (New York, 1968).

Alfvén a écrit d'autres livres qui sortent des canons formels et rigoureux des sciences exactes. Citons notamment : *Atom, Man, and the Universe* (San Francisco, 1969) et *M70-Living on the Third Planet* (avec son épouse Kerstin Alfvén, San Francisco, 1972).

### En dehors des sentiers battus

Avec la disparition d'Alfvén, la communauté des géophysiciens, des astrophysiciens et des cosmologistes perd un de ses plus éminents membres, un

scientifique courageux qui lutta souvent pour imposer ses idées, qui ne se contenta pas de recherches traditionnelles, mais qui préféra sans cesse relever de nouveaux défis intellectuels. Avec lui disparaît un homme de sciences et un auteur dont l'originalité et l'imagination étaient incontestablement débordantes. Durant toute sa carrière scientifique, Alfvén ne cessa d'orienter ses recherches en dehors des sentiers battus. C'est là qu'il fit ses plus belles découvertes et qu'il trouva les explications physiques correctes qui, bien souvent, ne furent comprises et admises qu'une ou deux décennies après leur publication. Il ne manqua pas non plus de souligner, à maintes reprises, la nécessité d'utiliser à la fois les expériences spatiales et celles menées en laboratoire comme guides à la compréhension théorique de la réalité physique.

### Remerciements

Nous remercions vivement Monsieur le Professeur Carl-Gunne Fälthammar du Royal Institute of Technology (Stockholm) pour les documents bibliographiques et scientifiques qu'il nous a envoyés. Monsieur le Professeur Fälthammar a été un collaborateur de longue date et un ami personnel d'Hannes Alfvén. De nombreux aspects de l'œuvre et de la vie d'Alfvén n'auraient ainsi pas pu être rapportés dans cet article sans son aimable collaboration. Les auteurs seront cependant tenus comme seuls responsables des éventuelles inexactitudes qui auraient échappé à leur attention.

### RÉFÉRENCES

ALFVÉN H., «Existence of Electromagnetic-hydrodynamic Waves», *Nature*, 150, 405, 1942.

ALFVÉN H., «On Frozen-in Field Lines and Field Line Reconnection», *J. Geophys. Res.*, 81, 4019, 1976.

ALFVÉN H., *Cosmic Plasma*, Astrophysics and Space Science Library, Vol. 82, Reidel, Dordrecht (Holland), 164 pp., 1981.

ALFVÉN H. and FÄLTHAMMAR C.-G., *Cosmical*

*Electrodynamics*, Seconde édition, Oxford at the Clarendon Press, 228 pp., 1963.

ARRHENIUS G., FÄLTHAMMAR C.-G. and KOPAL Z., «Hannes Alfvén - The First Seventy Years», *Astrophysics and Space Science*, 55, 3, 1978.

DE B.R., «A 1972 Prediction of Uranian Rings Based on the Alfvén Critical Velocity Effect», *The Moon and the Planets*, 18, 339, 1978.

DESSLER A.J., «Fiftieth William Bowie Medal Presented to Hannes Alfvén», *Eos*, 70, n° 1, p. 9, January 3, 1989.

FÄLTHAMMAR C.-G., AKASOFU S. and ALFVÉN H., «The Significance of Magnetospheric Research for Progress in Astrophysics», *Nature*, 275, 185, 1978.

FÄLTHAMMAR C.-G., ARRHENIUS G., DE B.R., HERLOFSON N., MENDIS D.A. and KOPAL Z., «Hannes Alfvén at Eighty», *Astrophysics and Space Science*, 144, 1, 1988.

FÄLTHAMMAR C.-G., *Invited Opening Lecture at the International Workshop on Alfvén Waves*, Rio de Janeiro, 9-10 November 1994.