issn 0065-3713

INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE

3 - Avenue Circulaire
B - 1180 BRUXELLES

AERONOMICA ACTA

A - N° 306 - 1986

L'Interaction du vent solaire avec les comètes

par

M. ROTH

BELGISCH INSTITUUT VOOR RUIMTE-AERONOMIE

3 - Ringlaan
B - 1180 BRUSSEL

AVANT-PROPOS

Ce texte est le compte-rendu de la conférence que l'auteur a donnée au Planétarium de Bruxelles, le 17 avril 1986. Il sera publié aux éditions du Planétarium.

VOORWOORD

Deze tekst is het verslag van de voordracht gegeven door de auteur in het Planetarium van Brussel op 17 april 1986. Hij zal uitgegeven worden in de publikaties van het Planetarium.

FOREWORD

This text is the report of the conference given by the author at the Brussels Planetarium on April 17, 1986. It will be published by the Planetarium itself.

VORWORT

Dieser Text is der Bericht des Vortrages gegeben durch den Autor im Planetarium von Brüssel am 17 April 1986. Er wird herausgegeben werden in den Ausgaben des Planetariums.

L'INTERACTION DU VENT SOLAIRE AVEC LES COMETES

par

M. ROTH

Résumé

Une comète en pleine activité ne se meut pas dans le vide, mais dans le milieu interplanétaire, sans cesse alimenté par le vent solaire : un flot de particules électriquement chargées s'échappant en permanence du Soleil et baignant l'ensemble du système solaire. Il n'est certes pas inutile de rappeler que l'existence de ce vent fut proposée pour la première fois par l'astrophysicien allemand Biermann, en 1951, sur base de l'observation de la queue ionique des comètes.

Lorsque l'écoulement supersonique du vent solaire rencontre une atmosphère cométaire en expansion, une faible onde de choc peut éventuellement se développer en amont, analogue à celle que déclenche le passage d'un avion supersonique dans l'atmosphère terrestre... Ainsi commence le scénario qui décrit l'aspect macroscopique de l'interaction du vent solaire avec une comète proche du Soleil. Le récit complet est une extrapolation prudente de ce que deux décennies d'explorations planétaires et de recherches spatiales nous ont permis d'apprendre à propos des magnétosphères induites se développant parfois dans le cas d'une planète dépourvue de champ magnétique intrinsèque. Ce récit s'inspire également des résultats obtenus récemment à l'aide d'expériences réalisées en laboratoire et dans l'espace. Depuis peu, le scénario est en train de s'affiner, car des aspects microscopiques de l'interaction commencent ainsi à nous être révélé par des mesures in situ effectuées à bord des sondes spatiales envoyées pour la première fois à la rencontre des comètes.

Samenvatting

Een komeet in volle activiteit beweegt zich niet in het luchtledige maar wel in het interplanetair milieu dat voortdurend gevoed wordt door de zonnewind : een stroom elektrisch geladen deeltjes ontsnapt permanent uit de Zon en omhult het gehele zonnestelsel. Het is zeker niet overbodig eraan te herinneren dat het bestaan van deze wind voor de eerste maal voorgesteldd werd door de Duitse astropfysicus Biermann, in 1951, op basis van de waarneming van de ionenstaart van de kometen.

Wanneer de supersonische stroming van de zonnewind een kometaire atmosfeer in uitbreiding ontmoet, kan een zwakke schokgolf zich mogelijk stroomopwaarts ontwikkelen, overeenkomstig met de golf die de doortocht van een supersonisch vliegtuig in de aardse atmosfeer teweegbrent... Aldus begint het scenario dat het macroscopisch aspect van de wisselwerking tussen de zonnewind en een komeet dicht bij de zon beschrijft. Het complete verhaal is een voorzichtige extrapolatie van wat twee decennia planeet- en ruimteonderzoek ons toegelaten hebben te leren over geïnduceerde magnetosferen die zich soms ontwikkelen in het geval van een planeet zonder innerlijk magnetisch veld. Dit verhaal baseert zich ook op de resultaten die onlangs bekomen werden met behulp van experimenten verwezenlijkt in laboratorium en in de ruimte. Sinds kort wordt het scenario enigzins uitgebreider, daar microscopische aspecten van de wisselwerking ons nu ook onthuld worden door in situ metingen aan boord van de ruimtesondes die voor het eerst de ruimte ingestuurd werden om er de kometen te ontmoeten.

Abstract

A comet in full activity does not move in the vacuum but in the interplanetary environment, constantly fed by the solar wind : a stream of electrically charged particles permanently escaping from the Sun and bathing the whole of the solar system. It is certainly not useless to remind that the existence of this wind was suggested for the first time by the German astrophysicist Biermann, in 1951, based on the observation of the ion tail of comets.

When the supersonic flow of the solar wind meets a cometary atmosphere in expansion, a weak shock wave might develop upstream, similar to the wave caused by the passage of a supersonic plane in the terrestrial atmosphere... Thus starts the scenario describing the macroscopic aspect of the interaction between the solar wind and a comet close to the sun. The complete story is a careful extrapolation of what two decades of planetary exploration and space research have permitted us to learn about the induced magnetospheres which sometimes develop in the case of a planet without intrinsic magnetic field. This story also takes its inspiration from the results recently obtained with experiments realized in laboratory and space. Lately the scenario has been expanding, for microscopic aspects of the interaction are also being revealed to us by in situ measurements made aboard the space probes sent into space for the first time in order to meet the comets.

Zusammenfassung

Ein komet in voller Aktivität bewegt sich nicht im luftleeren Raum aber im interplanetaren Milieu dass fortwährend alimentiert wird durch den Sonnenwind : ein Strom elektrisch geladen Teilchen entschlüpt ständig von der Sonne und umhüllt das ganze Sonnensystem. Es is nicht überflüssig in Erinnerung zu bringen dass die Existenz dieses Windes zum erten Mal vorgestellt wurde durch den Deutschen Astrophysiker Biermann, in 1951, mit als Basis die Beobachtung des Ionenschwanzes des Kometes.

Wenn die Überschallströmung der Sonnenwind ein kometärer Atmosphäre der sich ausbreiteit trifft, kann eine schwache Stosswelle sich möglich stromaufwärts entwickeln, übereinstimmend mit der Welle die die Durchfahrt eines Überschallflugzeuges in der irdischen atmosphärc verurscacht... So beginnt das Szenar dass der makroskopische Aspekt der Wechselwirkung zwischen dem Sonnewind und einem Komet dicht bei der Sonne beschreibt. Die komplette Geschichte ist eine vorsichtige Extrapolation von was zwei Dezennien Planet- und Raumforschung uns zugelassen haben zu lehren über induzierten Magnetosphären den bisweilen entwickeln in Fall eines Planetes ohne inneres magnetisches Feld. Diese Geschichte basiert sich auch auf den Resultaten kürzlich bekommen mit der Hilge von Experimenten getan im Laboratorium und in Raum. Seit kurzem ist das Szenar einigermassen ausgebreiteit, der mikroscopische Aspekten der Wechelwirkund uns jetzt auch enthüllt werden durch in situ Messungen an Bord der Raumsonden der zum ersten Mal dem Raum einflagen zur Begegnung der Kometen.

1. LA FORMATION DES QUEUES COMETAIRES

Si l'on excepte quelques comètes, dont la plus célèbre est la comète Arend-Roland (1957, III), qui manifestent de surcroît une anti-queue, sorte d'éperon dirigé vers le Soleil, la plupart des comètes actives développent une queue qui s'oriente grossièrement dans la direction opposée au Soleil. Cette queue a tendance à se dédoubler (figure 1) et ce phénomène est parfois très spectaculaire pour certaines comètes, comme par exemple Mrkos (1957 V) et West (1976 VI). Ainsi, sur les photographies de comètes bien développées on distingue en général deux catégories de queues, appelées type I et type II. Les queues de type I sont rectilignes et présentent une structure fine très complexe. Les queues de type II, par contre, sont courbées et diffuses. Sur une photographie en couleur, la queue de type I apparaît bleue et celle de type II jaune-orange. Parfois aussi, on se réfère à des queues de type III. Celles-ci sont alors des queues fortement courbées. Les queues de type II et III sont composées de poussières et leur coloration est due à la diffusion de la lumière solaire par ces poussières.

Les anti-queues, que l'on observe rarement, n'apparaissent dirigées vers le Soleil que par un effet de perspective dû au passage de la Terre dans le plan de l'orbite cométaire. Les poussières qui les constituent sont probablement beaucoup plus grosses que celles qui caractérisent les queues de type II et III. Par conséquent, la pression de radiation due au rayonnement solaire y exerce une force de répulsion négligeable. Ces poussières restent donc dispersées le long de l'orbite de la comète, contrairement à celles, beaucoup plus fines, des queues de type II qui sont littéralement soufflées hors du système solaire par la pression de radiation. Dans le cas des queues de type II, l'impulsion transmise aux grains de poussière par les photons du rayonnement solaire leur communique des accélérations deux à trois fois plus fortes que celle due à l'attraction du Soleil. C'est pourquoi, sous l'action combinée de

Fig. 1.- Photographie de la comète MKROS (1957 V), prise le 17 août 1957. La forme rectiligne de la queue de type I est due au vent solaire. La forme de la queue de type II est due à la pression de radiation des photons solaires (cliché JPL/NASA).

cette attraction et de la pression de radiation, la queue de poussières apparaît incurvée et diffuse. On peut d'ailleurs expliquer la géométrie de cette queue par une théorie purement mécanique établie par Bessel (1784-1846) à partir d'observations de la comète de Halley, en 1835, théorie qui fut ensuite perfectionnée par l'académicien soviétique Bredichin (1831-1904).

Il a fallu, par contre, attendre jusqu'en 1951, pour qu'une réponse soit fournie à la question de savoir comment se forment les queues de type I. A cette époque, on savait cependant déjà, grâce à l'analyse spectrale, que celles-ci étaient d'une nature tout à fait différente de celle des queues de type II, puisque des ions, tels CO^+, y avaient été détectés.

Les queues de type I sont donc constituées d'un plasma comprenant notamment des ions CO^+ et H_2O^+. La coloration bleue, caractéristique des queues de type I est d'ailleurs due aux ions CO^+ qui, par fluorescence, sont les principaux émetteurs dans le domaine visible. C'est à l'astrophysicien allemand Biermann que revint le mérite de montrer que la queue ionisée d'une comète est sensible à des particules du même type, donc électriquement chargées, ces particules étant émises par le Soleil. Biermann venait en fait de découvrir le vent solaire : ce flot de particules chargées soufflées en permanence par le Soleil dans l'espace interplanétaire et qui baigne l'ensemble du système solaire. L existence de ce vent solaire sera d'ailleurs confirmée, dès 1958, par des mesures in situ réalisées par les sondes spatiales soviétiques Lunik III et Venus I. La découverte de Biermann souligne ainsi, dès 1951, l'importance des mécanismes qui régissent l'interaction des comètes avec leur milieu ambiant.

2. LA DECOUVERTE DU VENT SOLAIRE

L'épaisseur des queues de plasma varie entre 100.000 et 1.000.000 km mais leur longueur peut atteindre et parfois même dépasser 1 unité astronomique (150.000.000 km). Elles sont jallonnées d'inhomogénéités diverses (figure 2) et leur aspect peut complètement changer d'un jour à l'autre (figure 3). Même les détails que l'on y observe se modifient souvent d'heure en heure. Ainsi, l'accélération de structures identifiables sur des photographies successives excède le plus souvent l'attraction gravitationnelle du Soleil d'un facteur compris entre 50 et 200, parfois davantage.

En 1943, Wurm montre que la pression de radiation ne peut pas rendre compte d'accélérations aussi considérables. En 1951, Biermann suggère l'existence du vent solaire et calcule que l'accélération des ions cométaires résultant du couplage coulombien entre ces ions et les électrons interplanétaires est bien de l'ordre de celle observée lors du déplacement de structures dans les queues de plasma. On sait aujourd'hui que ce résultat est incorrect, car Biermann avait surestimé la concentration des électrons du vent solaire, dont on n'avait d'ailleurs à l'époque qu'une estimation vague, basée sur des mesures indirectes telles que celles de la composante polarisée de la lumière zodiacale ou encore celles des variations du champ magnétique terrestre au cours des tempêtes géomagnétiques. Cependant, il y avait malgré tout un argument solide en faveur de l'existence du vent solaire que Biermann mit en exergue. Cet argument résultait des travaux de Hoffmeister sur l'orientation des queues de plasma. Celui-ci avait en effet montré que les queues de plasma ne sont pas exactement alignées le long de l'axe Soleil-Comète, mais sont légèrement inclinées par rapport à cet axe d'un angle en moyenne égal à environ 5°. Biermann montra ainsi que, si l'on admet l'existence du vent solaire, l'écart angulaire que Hoffmeister mesure pour les queues de plasma résulte simplement d'un effet d'aberration : le vent solaire

Fig. 2.- Photographie de la comète MRKOS (11957 V), prise le 22 août 1957. On note ici la remarquable différence entre la queue de type I : rectiligne, formée de gaz ionisés et la queue de type II, formée de particules de poussières (cliché JPL/NASA).

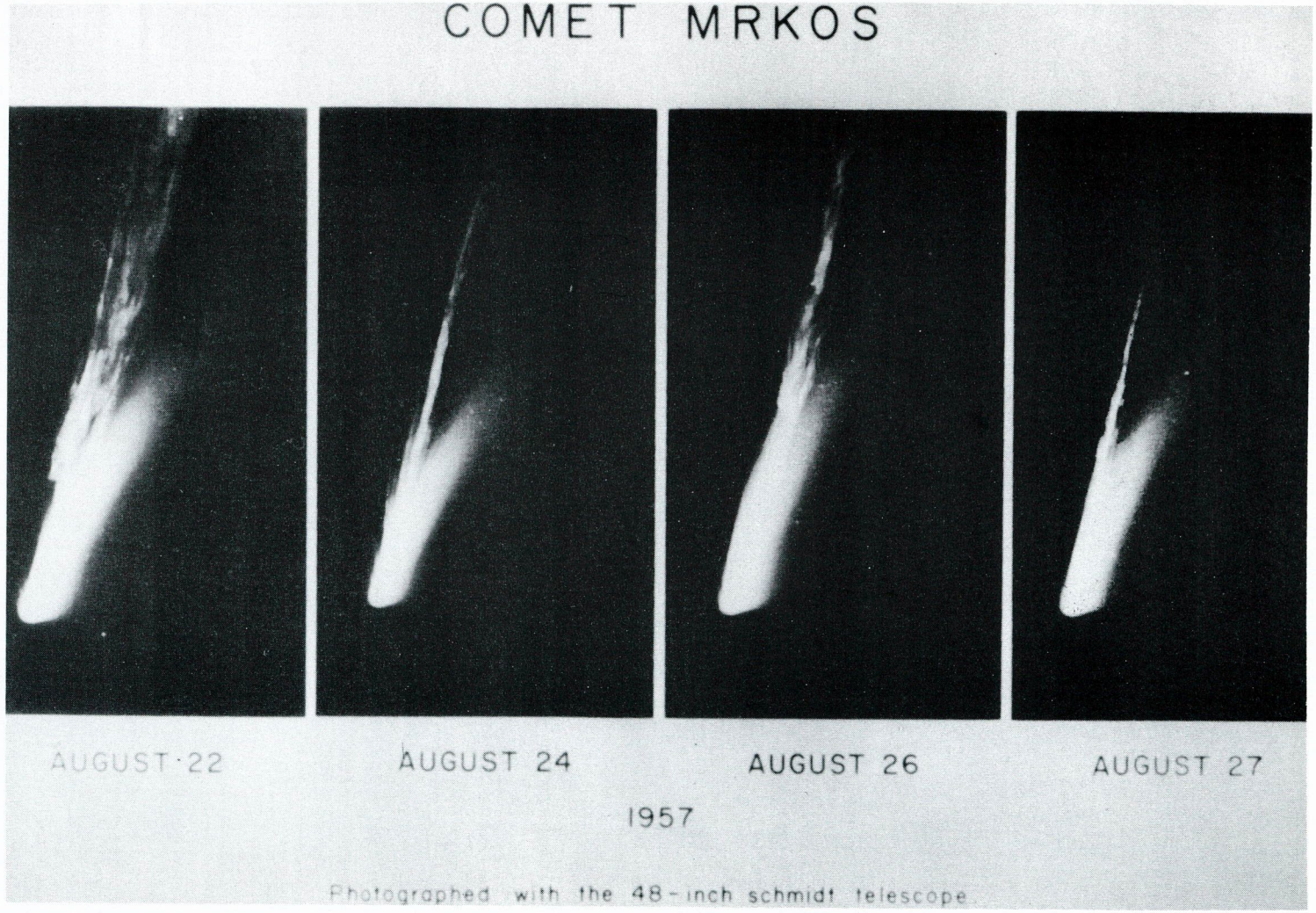

Fig. 3.- Comète MRKOS (1957 V) : 4 vues prises les 22, 24, 26 et 27 août 1957. L'évolution de la queue ionisée est fonction de la distance de la comète au Soleil et de l'état du vent solaire (cliché JPL/NASA).

produisant le même effet qu'un vent très violent soufflant de biais aurait sur l'écharpe qui traîne d'une voiture en mouvement. L'écart angulaire par rapport à l'axe Soleil-Comète est d'autant plus grand que la vitesse orbitale des comètes est grande. Comme celle-ci est de l'ordre de quelques dizaines de km/s et que l'écart angulaire est faible, on en déduit donc que la vitesse du vent solaire doit être beaucoup plus grande que la vitesse orbitale des comètes.

Cet effet d'aberration est aujourd'hui à la base d'une technique très puissante qui permet de déterminer les paramètres moyens décrivant l'écoulement du vent solaire. Cette technique, développée par Brandt et ses collaborateurs, consiste à mesurer sur de nombreux clichés photographiques de comètes, l'écart angulaire que fait la queue de plasma avec l'axe Soleil-Comète. A l'heure actuelle (figure 4), ces mesures portent sur un échantillon de plus de huit cent observations. En appliquant à cet échantillon, les méthodes de l'analyse statistique et en faisant diverses hypothèses sur la structure du champ de vitesse du vent solaire (en particulier W_r = constante), on arrive ainsi à déduire, non seulement la composante radiale, W_r, mais aussi les autres composantes, W_θ et W , qui représentent les faibles déviations par rapport à un écoulement purement radial. La figure 4 montre qu'avec un échantillon de 809 observations, la composante radiale est de l'ordre de 400 km/s, tandis que les autres composantes restent faibles, de l'ordre de quelques km/s. Les valeurs indiquées à la figure 4 ne représentent qu'une moyenne globale. En particulier, elles ne représentent qu'une vitesse "moyenne" du vent solaire sur une période d'environ 75 années, couvrant plusieurs cycles de l'activité solaire. Ces résultats sont en bon accord avec ceux déduits des mesures effectuées par satellite dans le plan de l'Ecliptique, ainsi qu'avec la théorie du vent solaire. Par conséquent, on peut affirmer que l'interprétation des queues de plasma basée sur l'effet d'aberration est aujourd'hui amplement prouvée, ce qui confirme donc de façon éclatante l'hypothèse du vent solaire émise par Biermann, il y a plus de trente ans.

MODELE DE VENT SOLAIRE DEDUIT DE
L'OBSERVATION DES QUEUES COMETAIRES

	ECHANTILLON PRINCIPAL	ECHANTILLON PLUS GRAND
w_r (km sec^{-1})	402 ± 12	400 ± 11
$w_{\phi,0}$ (km sec^{-1})	7.0 ± 1.8	6.7 ± 1.7
w_m (km sec^{-1})[a]	+2.6 ± 1.2	+2.3 ± 1.1
Nbre D'OBSERVATIONS	678	809

a LES VALEURS POSITIVES INDIQUENT
UN ECOULEMENT QUI DIVERGE DU PLAN DE L'EQUATEUR

Fig. 4.- Paramètres du vent solaire déduits de l'observation des queues de plasma (d'après Brandt J.C. and Chapman R.D., Introduction to comets, Cambridge University Press, p. 163, 1982).

3. LA STRUCTURE A GRANDE ECHELLE DU VENT SOLAIRE ET DU CHAMP MAGNETIQUE INTERPLANETAIRE

Le vent solaire prend naissance dans la couronne, sorte d'atmosphère du soleil. Celle-ci contient un plasma très chaud (2×10^6 K) - principalement de l'hydrogène. A cause de leur grande vitesse d'agitation thermique (plus de 5000 km/s), les électrons de la couronne peuvent se libérer facilement de la gravité du Soleil et s'échappent donc vers l'extérieur, en entraînant avec eux les protons, grâce à l'attraction coulombienne qui les unit. Dans la couronne, l'attraction gravitationnelle du Soleil confinait le plasma sous une forte pression. Par contre, dans l'espace interplanétaire, la pression est bien moindre. Par suite de cette différence de pression, la couronne éjecte son plasma avec une vitesse très élevée, en tout cas supérieure à celle du son dans le milieu ambiant. Le vent solaire acquiert donc une vitesse supersonique dans la couronne. Cette vitesse reste ensuite approximativement constante jusqu'au niveau de l'orbite terrestre, et même au-delà. Elle est en moyenne, comme nous l'avons vu, de l'ordre de 400 km/s. La concentration des particules du vent solaire, diminue elle régulièrement, comme l'inverse du carré de la distance au Soleil : $\sim 10^{12}$ cm^{-3} au niveau de la couronne, ~ 10 cm^{-3} au niveau de l'orbite terrestre et seulement ~ 1 cm^{-3} au niveau de l'orbite de Jupiter.

Comme l'ont montré différentes études effectuées aux Etats-Unis par Svalgaard et Wilcox, en 1978, le champ magnétique solaire moyen possède une configuration approximativement dipolaire, analogue à celle d'un barreau aimanté. Cependant, ce champ moyen diffère d'un champ dipolaire sous deux aspects essentiels. En effet, d'une part, les lignes de force dont la latitude solaire n'est pas très élevée, au lieu de se refermer d'un pôle à l'autre, sont emportées par le vent solaire dans le plan équatorial du Soleil. Dès lors, dans le voisinage du plan de l'Ecliptique, proche de l'équateur solaire, il se forme alors une lame

neutre, mince couche de plasma à l'intérieur de laquelle le champ magnétique s'annule éventuellement tout en changeant de polarité. D'autre part, les lignes de force proches des régions polaires sont radiales et ouvertes sur l'espace interplanétaire. Ces l gnes de force ouvertes sont mises en évidence indirectement sur les clichés en rayons X du Soleil, où apparaissent des zones sombres, les trous coronaux. Ceux-ci sont des régions où le gaz chaud de la couronne ne peut pas être confiné et s'échappe donc librement vers l'extérieur, le long de lignes de force ouvertes. Ces trous coronaux se situent en général dans le voisinage des pôles, mais ils évoluent aussi au cours du temps, même au cours d'une rotation solaire de 27 jours. Ainsi, ils peuvent se déplacer vers l'équateur et déplacer avec eux les lignes de force fermées susceptibles d'être soufflées par le vent. Dès lors celles-ci ne restent pas en réalité symétriques par rapport à l'équateur. Ainsi, en suivant le déplacement des trous coronaux, la lame neutre va se mettre à onduler de part et d'autre de l'équateur solaire. La situation est alors celle illustrée à la figure 5 : la lame neutre qui ondule de part et d'autre de l'équateur forme des plis que l'on compare souvent à ceux d'une jupe de ballerine. En effet, à cause de la rotation du Soleil sur lui-même en 27 jours, ces plis, qui partent de la surface solaire, s'enroulent en spirale et l'ensemble de la jupe tourne avec le Soleil. La lame neutre traverse l'Ecliptique en plusieurs endroits et divise celui-ci en autant de secteurs magnétiques de polarités opposées. Le nombre de ces secteurs magnétiques varie entre 2 et 6 suivant l'activité solaire.

4. CHAMPS MAGNETIQUES ET COMETES

Bien qu'on n'ait pas encore identifié avec certitude la nature réelle du déplacement de structures dans les queues de plasma, on pense néanmoins aujourd'hui que le champ magnétique interplanétaire joue un rôle essentiel lorsqu'il s'agit d'expliquer les accélérations considérables observées au cours du déplacement de ces structures. Deux explications au moins sont ainsi avancées, toutes deux en terme de champ

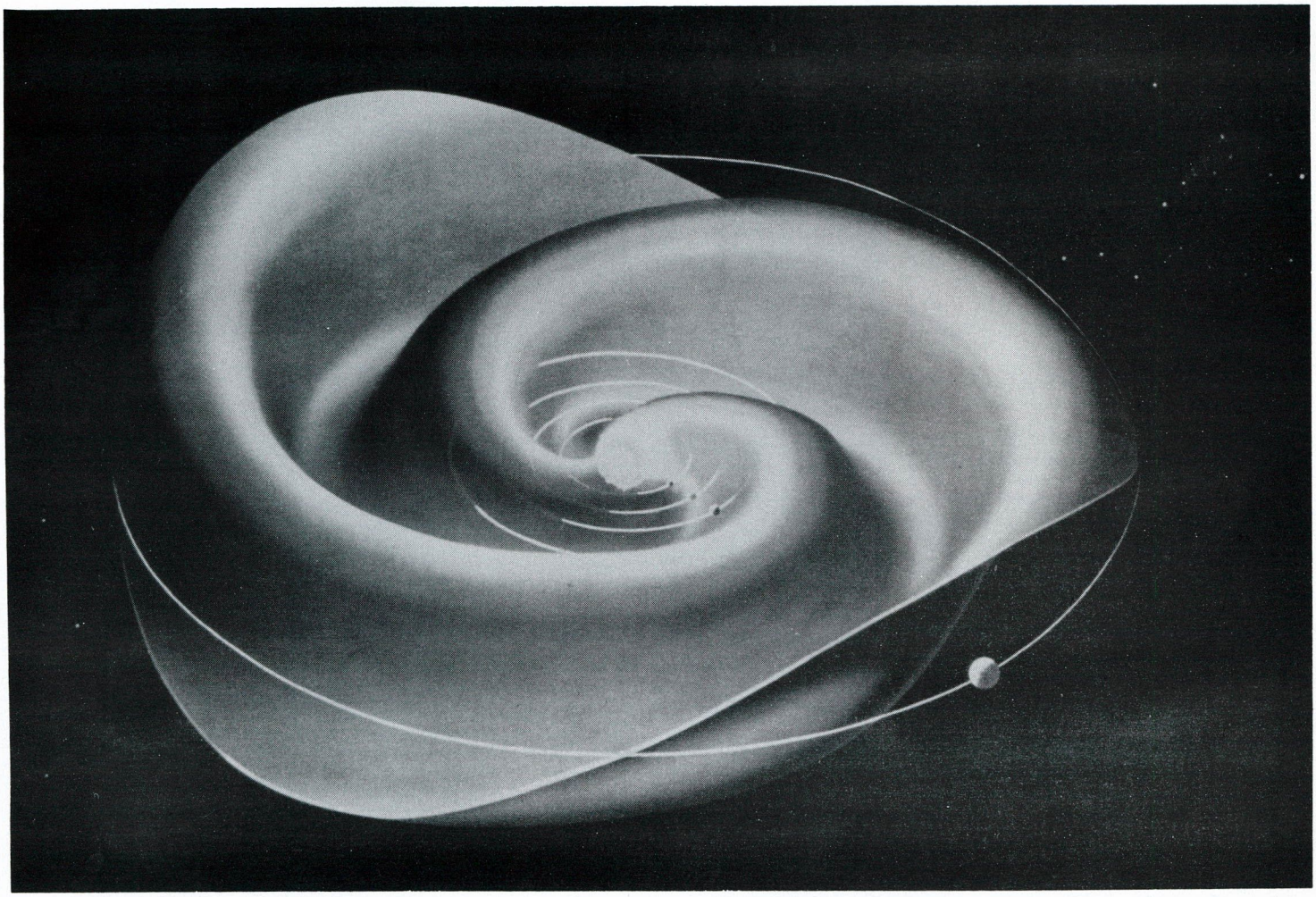

Fig. 5.- Modèle de la jupe de ballerine du champ magnétique interplanétaire. La lame "neutre", qui sépare les lignes de champ de polarité opposée, ondule de part et d'autre de l'équateur solaire, proche de l'Ecliptique. A cause de la rotation du Soleil sur lui-même en 27 jours, les plis s'enroulent en spirale et l'ensemble de la jupe tourne avec le Soleil. Ces plis divisent l'Ecliptique en autant de secteurs magnétiques de polarités opposées. (Dessin de W. Heil, conseiller J.M. Wilcox, aimablement communiqué par L. Svalgaard).

magnétique. La première considère que le déplacement observé ne correspond pas à un déplacement réel de matière mais bien à une onde d'Alfvèn se propageant de la coma vers la queue. Comme la vitesse des ondes d'Alfvèn dans un plasma est inversément proportionnelle à la racine carrée de la densité et que cette densité est la plus grande dans la coma, on explique ainsi pourquoi le déplacement apparent est de plus en plus rapide au fur et à mesure que l'onde s'éloigne de la tête de la comète. La seconde hypothèse considère que le déplacement observé correspond à un déplacement réel de matière, c'est-à-dire au déplacement d'une inhomogénéité locale dans le plasma (nodosité ou condensation). Dans ce cas aussi, le champ magnétique serait responsable des accélérations observées. Celles-ci résulteraient alors de la compression des tubes de force du champ magnétique, due au gradient du champ transversalement aux lignes de force. Comme ces tubes de force sont en réalité drapées autour de la tête et s'ouvrent en aval dans la queue de plasma, cette compression aurait donc pour conséquence d'expulser le plasma des tubes de force, un peu comme de la pâte dentifrice est expulsée de son tube par une compression latérale.

Que le champ magnétique interplanétaire puisse jouer un rôle important est d'ailleurs très fortement suggéré par les faits d'observation suivants : Ainsi, comme sur le cliché de la figure 6, on observe fréquemment qu'un ensemble de rayons rectilignes jouxtent la partie centrale de la queue de plasma. Ces rayons sont très étroits puisqu'on estime que leur épaisseur est en tout cas inférieure à 4000 km. Ces rayons évoluent au cours du temps : ainsi un rayon donné naît près de la tête, s'étire ensuite tout en se rapprochant de l'axe de la queue où il s'y fond finalement. De même, le cliché de la figure 7 montre qu'il n'est pas rare de rencontrer des parties coudées ainsi que des ondulations hélicoïdales dans les queues de plasma.

En se basant sur l'observation fréquente de rayons, Alfvèn proposa en 1957, le modèle illustré à la figure 8 : les lignes de force du champ

Fig. 6.- Comète de Halley : vue prise le 9/1/86 au Mount Tom Field Station, Univ. of Denver, USA - Exposition 30 minutes [Photo de couverture de la revue "Sky and Telescope", mars 1986].

Fig. 7.- Comète de Halley : vue prise le 11/1/86 à l'Observatoire de Haute-Provence à l'aide d'un télescope de Schmidt de 62 cm d'ouverture, f/3,5 - 24 minutes de pose - queue : 3° ≃ 14 x 10^6 km. Une ondulation hélicoïdale est bien visible sur cette photographie [Cliché Observatoire de Haute-Provence du CNRS].

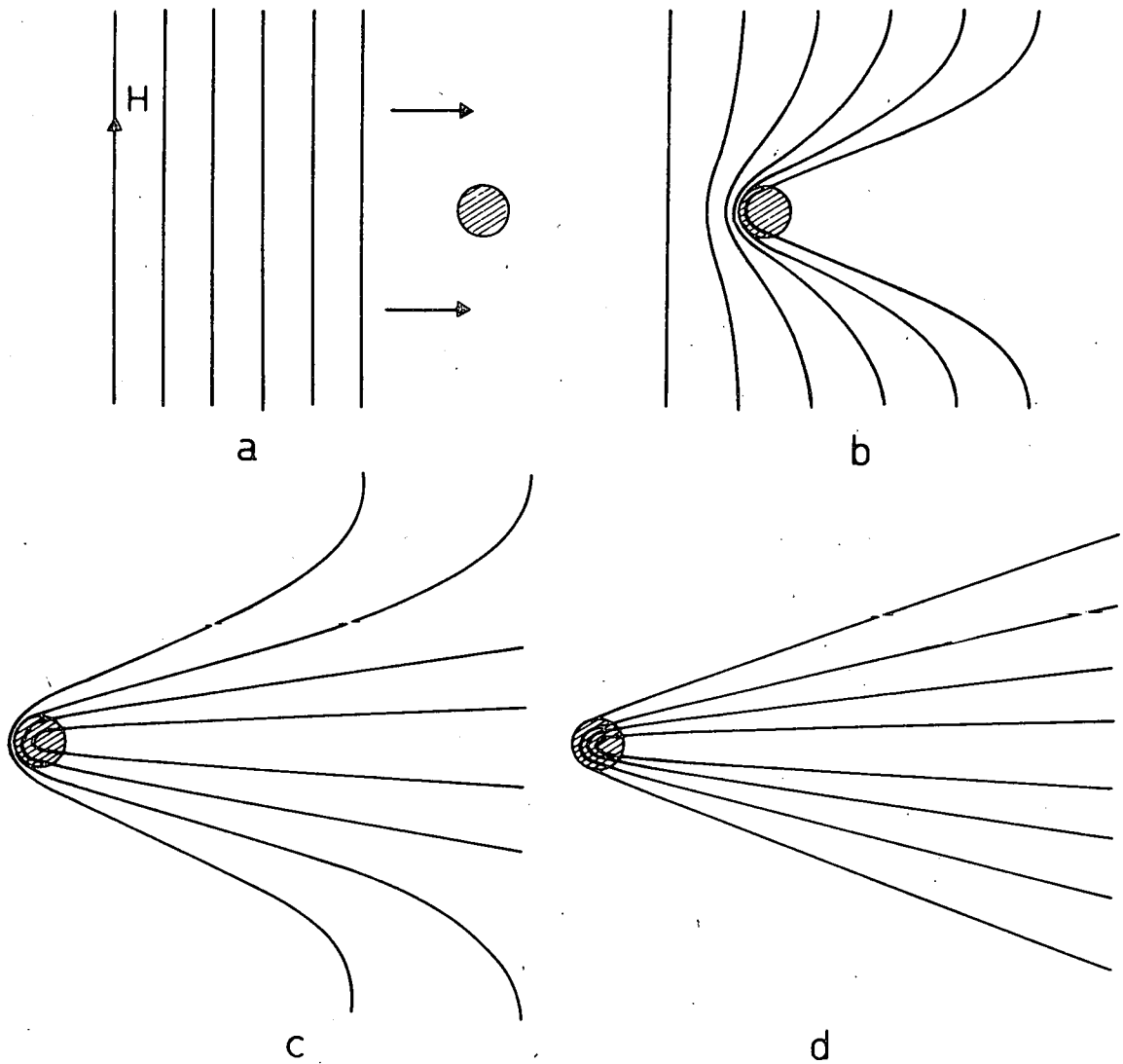

Fig. 8.- Modèle d'Alfvèn de l'interaction du champ magnétique interplanétaire avec l'ionosphère cométaire (d'après Mendis et Houpis, 1982).

magnétique interplanétaire ne peuvent pas pénétrer dans les couches denses de l'ionosphère cométaire et s'accumulent donc en amont, tout en s'incurvant progressivement pour former des tubes de force ouverts dans la direction opposée au Soleil. Les électrons et les ions cométaire sont ainsi canalisés le long de ces tubes de force qu'ils visualisent alors sous l'aspect de fins rayons.

On pense également que le champ magnétique interplanétaire est à l'origine de ces phénomènes spectaculaires que sont les détachements brusques de queues de plasma. Un tel détachement est illustré à la figure 9 pour la comète Morehouse (1908, III). A l'heure actuelle, le modèle le plus en vogue pour expliquer ces "déconnexions" invoque le passage de la comète au travers de la frontière séparant deux secteurs du champ magnétique interplanétaire. En effet, l'inversion du champ magnétique de part et d'autre de cette frontière a pour conséquence l'épluchement des lignes de force autour de la coma. Ces lignes de force finissent ainsi par se déconnecter entièrement du corps de la comète, entraînant avec elles la queue de plasma. Ce modèle théorique semble de plus en plus viable à l'heure actuelle car il existe une très haute corrélation entre plusieurs observations de déconnexions et des observations correspondantes d'inversion de polarité du champ magnétique interplanétaire.

5. MODELE MAGNETOHYDRODYNAMIQUE DE L'INTERACTION AVEC LE VENT SOLAIRE

La figure 10 représente schématiquement l'interaction du vent solaire avec une comète brillante, proche du Soleil (~ 1 U.A.). Le couplage gaz-poussières n'est effectif que jusqu'à une distance de l'ordre de 100 km du noyau. A cette distance, la vitesse des molécules de gaz est déjà supérieure à la vitesse de libération due à la gravité du noyau et ces molécules peuvent donc s'échapper facilement vers l'extérieur. Elles subissent alors l'action du rayonnement solaire ce qui va conduire, par dissociation et ionisation, à la formation

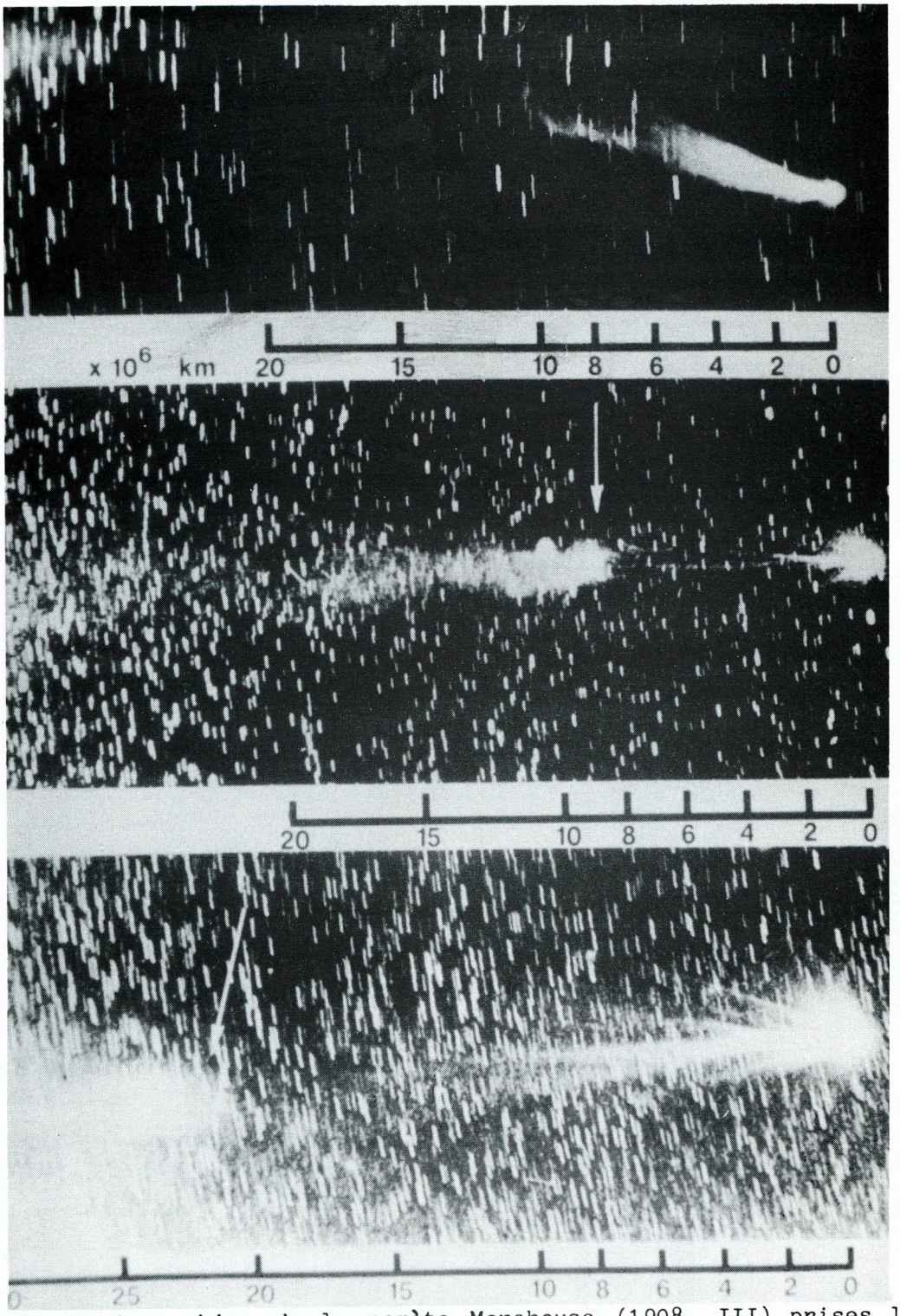

Fig. 9.- Photographies de la comète Morehouse (1908, III) prises le 30 septembre (photo du haut), le 1er octobre (photo centrale) et le 2 octobre 1908 (photo du bas) par l'astronome E.E. Barnard à l'Observatoire de Yerkes. Ces clichés montrent que la queue de plasma peut parfois se détacher entièrement de la tête pour se reformer par la suite. [D'après une série de diapositives de l'Astronomical Society of the Pacific - San Francisco].

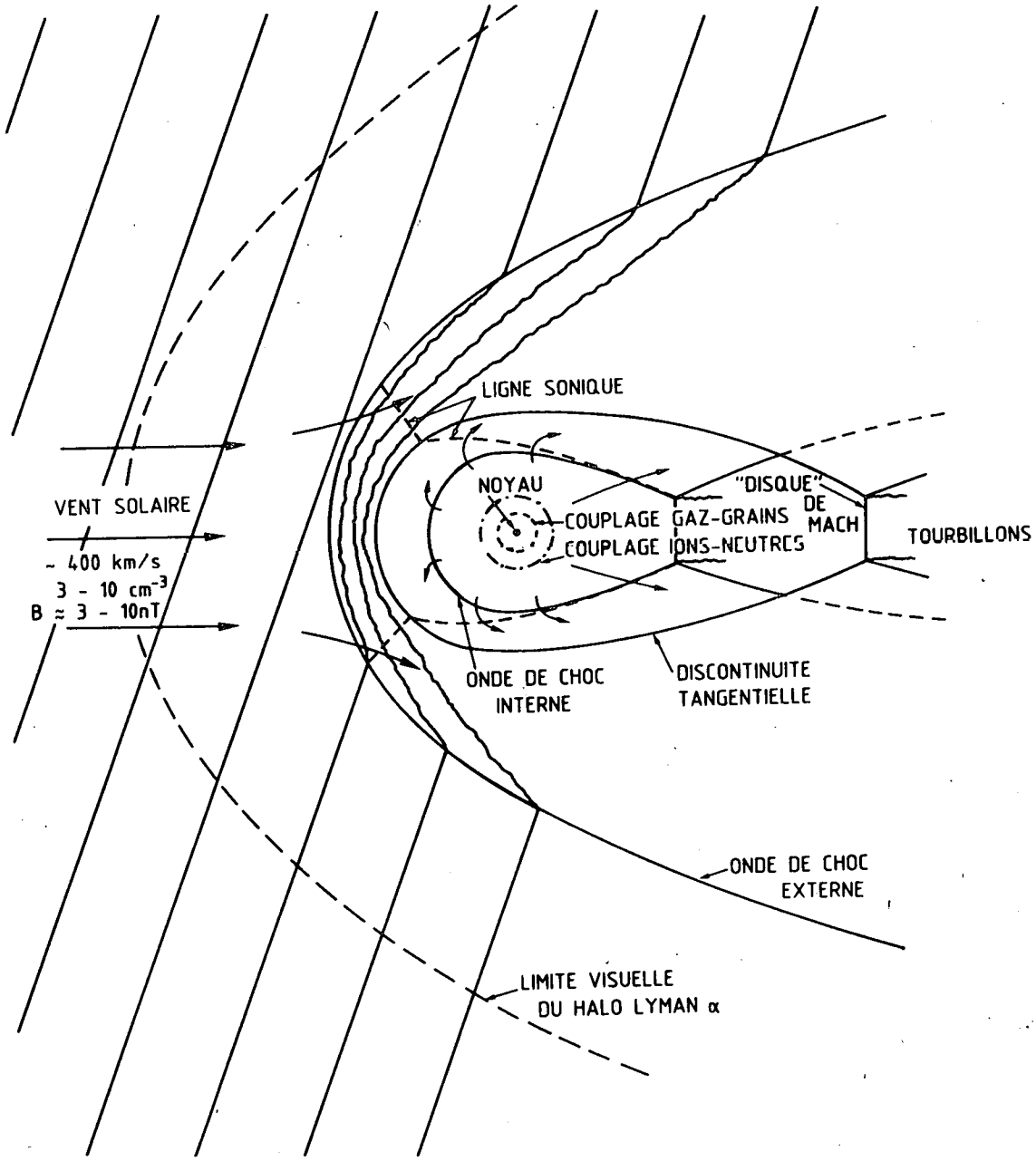

Fig.10.- Représentation schématique de l'interaction du vent solaire avec une atmosphère cométaire bien développée (d'après Mendis and Houpis, 1982 - adaptée de Wallis and Dryer, Astrophys. J., 205, 895, 1976).

d'espèces plus simples : neutres et ionisées. Jusqu'à une distance de l'ordre de 1000 km du noyau, le gaz cométaire est cependant encore un gaz soumis aux collisions. Mais au-delà, les particules neutres commencent à se comporter comme des particules libres et se découplent des particules chargées : certaines sont ionisées à leur tour et rejoignent le plasma cométaire en expansion pour former une véritable ionosphère tandis que les autres vont former un nuage de gaz neutre, en expansion radiale. Certains atomes, comme les atomes d'hydrogène, sont encore détectés à plus de 10^7 km du noyau, où ils forment un halo invisible à l'oeil. Ces atomes émettent par contre dans l'ultraviolet, avec une longueur d'onde caractéristique de la raie Lyman-α.

Cependant, à la périphérie de l'atmosphère neutre en expansion, des ions sont constamment créés, soit par photo-ionisation, soit encore par échange de charge avec le vent solaire. Aussitôt créés, ces ions sont capturés par le champ magnétique interplanétaire. Il en résulte donc un apport continu d'ions lourds au sein du vent solaire et par conséquent celui-ci va être freiné, dès qu'il s'approche de la comète. Il peut éventuellement devenir subsonique, et comme dans le cas de la planète Vénus, une onde de choc est susceptible de se développer en amont de la comète. Les estimations théoriques prédisent que ce choc pourrait se situer à quelques centaines de milliers de km du noyau. Après son passage au travers de l'onde de choc, le vent solaire deviendrait donc subsonique, puis à nouveau supersonique, dès qu'il s'éloigne en aval, entraînant avec lui les ions cométaires qui formeront la queue de plasma.

En même temps, le champ magnétique interplanétaire qui accompagne toujours le vent solaire est lui-même déformé et comprimé jusqu'à une distance de l'ordre de 10.000 km du noyau, c'est-à-dire jusqu'à la surface de contact ou discontinuité tangentielle, qui limite la région à l'intérieur de laquelle la force d'expansion de l'atmosphère cométaire domine. Comme dans le cas de Vénus, il apparaît donc aussi une ionopause,

qui coïncide justement avec cette surface de contact. L'ionopause est ici la couche de transition entre l'ionosphère purement cométaire et le vent solaire contaminé par les ions lourds. Elle est le siège de courants électriques d'écran qui empêchent le champ magnétique interplanétaire de diffuser au-delà. Dans l'ionosphère proprement dite, différents régimes d'écoulement peuvent également subsister et on prévoit notamment la formation d'un choc interne.

La situation illustrée à la figure 10 se modifie bien sûr avec la distance de la comète au Soleil. Ainsi, si la comète est très loin du Soleil et qu'elle n'a pas encore développé d'atmosphère ou bien si elle est de courte période avec une faible production gazeuse, alors le vent solaire est directement absorbé par le noyau, l'interaction étant plutôt du type lunaire. En outre, le modèle proposé ici pour une comète brillante proche du Soleil ne représente que qualitativement l'interaction. Par exemple, les distances au noyau de l'onde de choc et de la discontinuité tangentielle peuvent varier très fortement avec le taux de production gazeuse de la comète et aussi avec l'intensité du vent solaire dont l'écoulement est loin d'être uniforme et stationnaire.

Le modèle illustré à la figure 10 est aussi basé sur nos connaissances de l'interaction du vent solaire avec les planètes, en particulier avec celles dépourvues de champ magnétique propre. L'atmosphère de Vénus, par exemple, a été explorée par diverses sondes spatiales : plusieurs de la série Vénera et Mariner ainsi que Pioneer Vénus et on y observe bien la formation d'une onde de choc et l'empillement des lignes de force du champ magnétique interplanétaire en amont de la planète. Depuis peu, des observations in situ sont réalisées dans les atmosphères cométaires et il est intéressant d'analyser les résultats à la lumière du modèle théorique de la figure 10.

6. CE QUE NOUS A APPRIS LA SONDE ICE (INTERPLANETARY COMETARY EXPLORER)

La sonde ICE a traversé la tête de la comète Giacobini-Zinner, à 8000 km en aval du noyau, en septembre 1985. Les mesures du champ magnétique ont confirmé le modèle d'Alfvèn qui prévoit le drapement des lignes de force autour de la coma, pour former une queue magnétique en aval de la comète.

Les mesures de champ magnétique ont également montré que la structure de la queue de plasma était composée de deux lobes magnétiques de polarités opposées, séparées par une "couche neutre" dont l'épaisseur est d'environ 1000 km. A l'intérieur de cette couche le champ magnétique est de l'ordre de 3 nT (nano-Tesla), mais atteint 60 nT à l'intérieur des lobes.

Cependant, aucun des signes caractérisant une onde de choc intense, tel qu'un changement brutal de la direction du champ magnétique, n'a été détecté. Il se pourrait donc que, dans certaines conditions, par exemple lorsque la densité des ions cométaires décroît relativement lentement avec la distance au noyau, l'apport d'ions lourds au vent solaire se fasse très progressivement et dans ce cas l'onde de choc apparaîtrait très faible. De la turbulence a néanmoins été détectée, à environ 200.000 km du noyau, là où l'on s'attendait à trouver une onde de choc bien caractérisée.

7. LES EXPERIENCES DE SIMULATION EN LABORATOIRE ET DANS L ESPACE

Plusieurs expériences de laboratoire ont été réalisées en vue de simuler l'interaction du vent solaire avec une comète. L'équipe soviétique dirigée par Podgorny s'est spécialisée dans ce genre de simulation. Une de ces expériences consiste à éjecter un plasma d'hydrogène dans la direction d'une boule de cire. Les différences d'échelle

avec la situation cométaire réelle sont bien entendu prises en considération. Par exemple, le rayon de la boule de cire n'est que d'un cm, tandis que la concentration électronique du plasma est de 10^{13} cm^{-3} avec des températures de 15 eV pour les électrons et 5 eV pour les protons. La composition de ce qui est censé être le noyau importe peu, puisqu'on ne veut simuler ici que l'aspect interaction avec un plasma. La seule chose qui importe vraiment c'est que les produits résultant de la vaporisation de la boule de cire soient très rapidement ionisés et produisent une atmosphère dont la dimension, la densité et la température respectent les échelles qui caractérisent le reste de l'expérience. Le faisceau de plasma, qui dure 20 µs, est accompagné d'un champ magnétique de 10 Gauss, perpendiculaire à la vitesse du plasma. La figure 11 illustre la configuration du champ magnétique et du courant électrique autour de la boule de cire. La similitude avec le modèle théorique prédit par Alfvèn dans le cas d'une comète réelle est frappante : On constate en effet l'empillement des lignes de force en amont et la formation d'une queue magnétique en aval, avec inversion de la polarité du champ magnétique dans la région centrale (couche neutre).

Dans le cadre de la mission AMPTE (Active Magnetospheric Particle Tracers Experiments), des expériences visant aussi à simuler l'interaction du vent solaire avec une comète ont été réalisées dans l'espace. Il ne s'agit cependant pas encore d'expériences pour lesquelles on va créer une véritable comète artificielle comprenant un noyau de composition physique et chimique identique à celle présumée d'un noyau véritable. Il s'agit ici d'étudier le comportement d'un nuage de baryum ionisé que l'on éjecte dans le vent solaire. Une de ces expériences a été réalisée en décembre 1984 lorsque le satellite ouest-allemand IRM (Ion Release Module) a procédé à un lâcher de nuage de baryum dans le vent solaire.

Le baryum est éjecté à l'état de vapeur, suite à une réaction de combustion avec de l'oxyde de cuivre. Les atomes de baryum sont ensuite

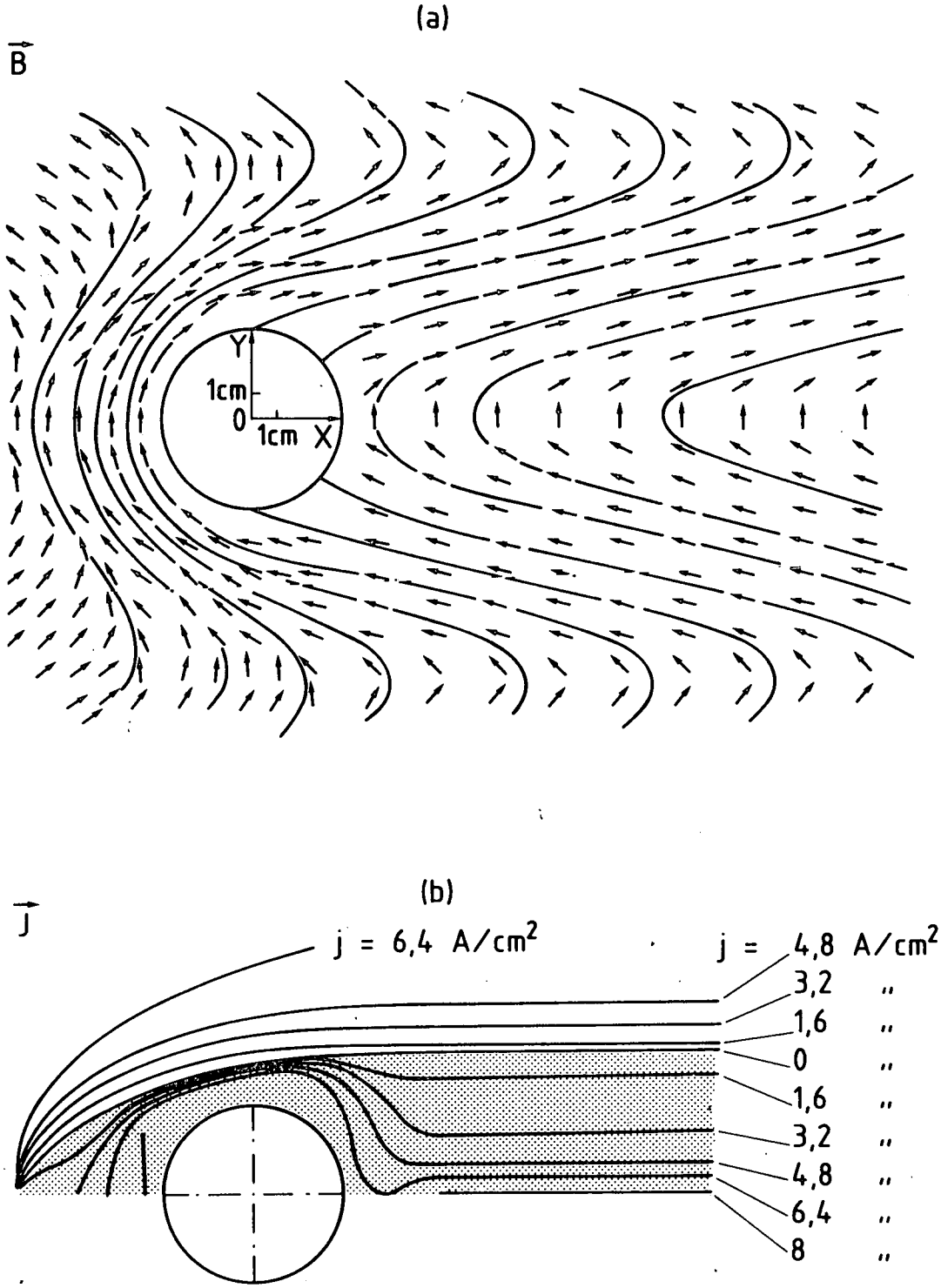

Fig.11.- (a) La configuration du champ magnétique dans la queue magnétique d'une comète artificielle en laboratoire; (b) la distribution correspondante de la densité de courant (d'après Podgorny et al, 1979, Astrophys. Space Sci., 61, 369-374).

rapidement photoionisés par le rayonnement solaire, en moins de 30 secondes. Ce nuage de baryum, lorsqu'il est complètement photo-ionisé, a une densité 10.000 fois supérieure à celle du vent solaire et il est en expansion radiale, son diamètre maximum atteignant 600 km; une situation semblable à celle d'une atmosphère cométaire, elle aussi en expansion radiale. Les atomes de baryum sont également excités par le rayonnement solaire et émettent une radiation violette qui rend le nuage visible lorsque le Soleil est juste en-dessous de l'horizon.

La comète "artificielle" obtenue le 27 décembre 1984 par l'équipe du Professeur Haerendel du Max-Planck Institut de Munich interagissait avec le vent solaire en montrant certaines similitudes avec le cas cométaire réel. Ainsi, on observa bien la formation d'une tête et d'une queue dirigée dans la direction opposée au Soleil. On nota également la formation d'une seconde queue dont l'évolution était tout à fait semblable à celle d'un rayon dans le cas d'une comète réelle. De plus, les mesures de champ magnétique montraient que le nuage de baryum se comportait bien comme une cavité diamagnétique : c'est-à-dire que le champ local, qui est le champ magnétique interplanétaire, n'avait pas diffusé à l'intérieur du nuage. Il s'agit ici encore d'une confirmation du modèle d'Alfvèn décrivant le champ magnétique autour d'une comète brillante proche du Soleil.

8. CONCLUSIONS

L'interaction du vent solaire avec les comètes est très complexe. Son étude s'est d'abord basée sur l'observation et l'interprétation des queues de plasma. Des modèles théoriques se sont ensuite développés à la lumière des connaissances acquises dans le cas de l'interaction avec les planètes, en particulier Vénus. Enfin, les expériences de simulation en laboratoire et dans l'espace ont aussi contribué au développement de la théorie. Cependant, il faut rester très prudent en extrapolant au cas

cométaire les résultats obtenus grâce à ces simulations. En effet, qu'il s'agisse de l'interaction avec Vénus, ou encore d'expériences en laboratoire ou dans l'espace, ces situations se distinguent très nettement l'une de l'autre par le volume et la quantité de matière caractérisant l'interaction. Il faut donc tenir compte des différences d'échelle avec la situation cométaire réelle.

A l'heure actuelle, l'étude de l'interaction du vent solaire avec les comètes est en train d'entrer dans l'ère du quantitatif depuis que les sondes spatiales (ICE, GIOTTO) ont commencé à explorer l'environnement cométaire. Ainsi, il n'est pas impossible qu'à la lumière des résultats que l'on commence à obtenir, un bon nombre de questions fondamentales ayant trait à l'interaction du vent solaire avec les comètes ne soient bientôt résolues.

REFERENCES

ARPIGNY, C., Modèles cométaires : noyau, coma et queues, Ciel et Terre, 101, 159-180, 1985.

BRANDT, J.C. and CHAPMAN, R.D., Introduction to comets, 246 p., Cambridge University Press, 1982.

BRANDT, J.C. and NIEDNER, M.B. Jr., The structure of comet tails, Scientific American, 39-46, January 1986.

MENDIS, D.A. and HOUPIS, H.L.F., The cometary atmosphere and its interaction with the solar wind, Rev. of Geophys. and Sp. Physics, 20, 885-928, 1982.

VALENZUELA, A., HAERENDEL, G., FÖPPL, H., MELZNER, F., NEUSS, H., RIEGEN, E., STÖCKER, J., BAUER, O., HÖFNER, H. and LOIDL, J., The AMPTE artificial comet experiments, Preprint. Max-Planck Institut Für Physik und Astrophysik, Garching, November 1985.

STEINBERG, J.L. et P. COUTURIER, Le vent solaire, La Recherche, 161, 1494-1502, 1984.

SVALGAARD, L. and WILCOX, J.M., A view of solar magnetic fields, the solar corona and the solar wind in three dimensions, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 429-443, 1978.

WILKENING, L.L. (Editor), Part V : Ion tails and solar wind interactions, p. 519-634 in "Comets", (766 p.), The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, second printing, 1983.