

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE LYON



REVUE TRIMESTRIELLE

Nouvelle série — N° 25 — 1986

Photo de couverture :

Stage d'initiation à l'Astronomie, organisée par la Société Astronomique de Lyon, août 1985, « Préparation du programme d'observations » .

Photo : C. Beaudoin.

SIRIUS ET SA MYSTÉRIEUSE NAIN BLANCHE

Conférence de Madame M.T. Martel, astronome à l'Observatoire de Lyon,
le 10 novembre 1984

Avec Sirius, l'étoile la plus brillante de tout le ciel, nous abordons l'espace des étoiles du voisinage solaire.

Les distances entre ces étoiles s'évaluent de façon commode et imagée en année de lumière. La lumière se déplace à une vitesse de 300 000 kilomètres par seconde. La planète Pluton, la plus éloignée du Soleil, à sa distance maximale, se trouve à six dix-millièmes d'année-lumière du Soleil.

Pour représenter concrètement les distances des six étoiles les plus proches du Soleil, pointons-les sur une carte de France en prenant pour échelle de l'année-lumière (a.l.) la demi-distance Lyon-Valence.

Le Système Solaire, implanté à Lyon, tient tout entier sur un terrain de 60 mètres de diamètre, bien inférieur à celui de la Place Bellecour. Les deux étoiles Proxima Centaure (4,1 a.l.) et α Centaure (4,3 a.l.) se situent vers Avignon, l'étoile de Barnard (8,2 a.l.) à Mulhouse, les deux étoiles Wolf 359 (8,1 a.l.) et Lalande 21 186 (8,2 a.l.) vers Paris et Sirius (8,7 a.l.) à La Rochelle. Par rapport à son éloignement du Soleil, Sirius occupe la sixième place des étoiles du voisinage solaire.

Pour repérer facilement la position de Sirius dans le ciel, il faut se familiariser avec les constellations. Observons attentivement la constellation d'Orion, nous distinguons immédiatement les trois étoiles du Baudrier, appelées aussi les Trois Rois et au-dessous de cette ligne une traînée lumineuse de trois étoiles rapprochées formant l'Épée d'Orion. Avec une jumelle, nous voyons l'étoile centrale de l'Épée noyée dans une nébulosité diffuse, la Grande Nébuleuse d'Orion. Les Trois Rois et l'Épée dessinent dans le ciel la lettre T majuscule. Si nous joignons, par la pensée, les étoiles du Baudrier et que nous prolongeons cette ligne vers le S.E., nous aboutissons à Sirius ou l'étoile α de la Constellation du Grand Chien, la plus belle de tout le ciel.

Sirius passe au méridien fin janvier. Elle est donc visible d'octobre à avril, d'abord sur le matin, puis sur le soir.

Sirius a joué un grand rôle dans l'Astronomie égyptienne. Sa première apparition comme étoile du matin prédisait l'inondation du Nil, le solstice d'été, les grandes chaleurs et les fièvres. L'apparition de Sirius marquait la date de la fameuse Canicule, période de chaleur, du nom latin de cette étoile α *Canis Majoris* (en latin canis, chien).

Détermination de la distance de Sirius.

La méthode utilisée est analogue à celle des mesures géodésiques d'objets éloignés, un clocher par exemple.

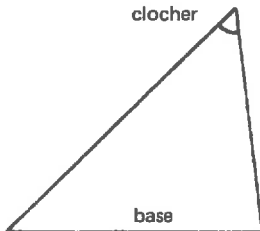


Fig. 1 - L'angle du clocher est la parallaxe

L'observateur détermine d'abord avec une bonne précision une base de repérage assez grande. Des deux extrémités de cette base, il vise le clocher. La convergence des lignes de visée définit l'angle sous lequel, du clocher, se voit la base de repérage; cet angle s'appelle la *parallaxe*. Connaissant la base et la parallaxe, il est alors facile de calculer la distance du clocher.

En astronomie, la seule base dont on dispose est le diamètre de l'orbite terrestre. Pour déterminer la parallaxe d'une étoile, on vise cette étoile à six mois d'intervalle - moments où la Terre se trouve en deux points diamétralement opposés sur son orbite. Sur la sphère céleste, l'étoile, en six mois, décrit une demi-ellipse dont le grand axe correspond au double de la parallaxe. La parallaxe d'une étoile se définit comme l'angle sous lequel un observateur verrait de l'étoile le rayon de l'orbite terrestre. Les parallaxes stellaires sont des angles très petits, tous inférieurs à 1". Il faut donc des mesures de position très soignées pour les déterminer avec exactitude. La détermination des parallaxes reste la meilleure méthode d'évaluation des distances pour des étoiles situées à moins d'une centaine d'années de lumière. Elle convient parfaitement à Sirius dont la parallaxe de 0"375 fournit pour la distance une valeur de 8'69 a.l.

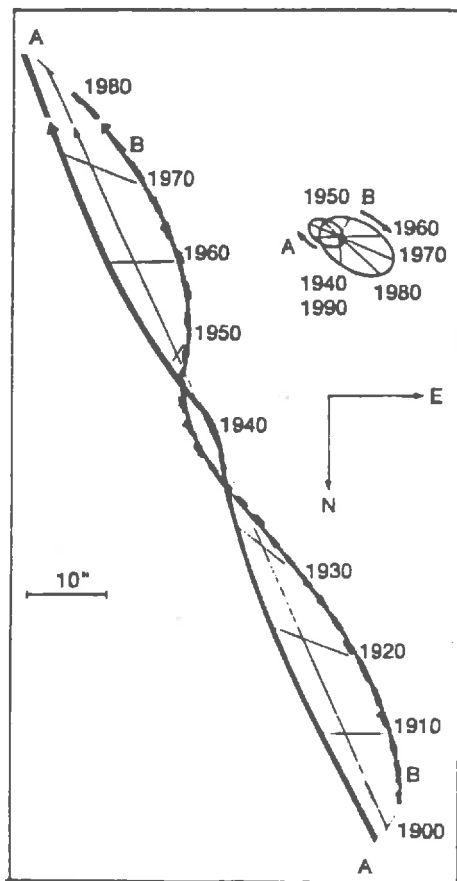


Fig. 2 - Mouvements propres de Sirius A
 (courbe en trait plein)
Mouvements propres de Sirius B
 (courbe en pointillés)

En haut à droite, les orbites elliptiques de Sirius A et B autour du centre de gravité du Système de 1940-1990

Mouvement propre - Découverte de Sirius B

En 1718, Halley découvre que les étoiles supposées fixes ne sont pas fixes. Arcturus s'est déplacée de 1° vers le Sud depuis le temps de Ptolémée, et Sirius d'environ la moitié moins. Ce déplacement dans le ciel porte le nom de *mouvement propre* de l'étoile, c'est un mouvement uniforme et rectiligne. En 1834, l'astronome allemand Bessel découvre que Sirius et Procyon ne se déplacent pas en ligne droite à travers le ciel. Leurs mouvements propres changent toujours légèrement dans des directions alternées. Leur parcours suit une ligne sinueuse. Dix ans après, Bessel conclut que chaque étoile possède un compagnon invisible, responsable des perturbations. Auwers détermine plus tard les orbites et les masses des deux composantes stellaires (fig. 2). Il fallut attendre 1862 pour déceler, visuellement et par hasard, le compagnon de Sirius, prédit par Bessel, lorsque Clark met en service, à l'Observatoire de Dearborn, la lunette de 47 cm qu'il avait construite avec son père. Pour tester les possibilités de sa lunette, Clark cherche à déterminer à quelle distance angulaire la lumière de Sirius devient perceptible avant que l'étoile cachée derrière le coin d'une construction ne vienne dans le champ. Clark est alors surpris de découvrir un faible compagnon, Sirius B, situé à 10"07 de Sirius A dix mille fois plus brillante. Bard, à Harvard, confirme très rapidement la découverte visuelle de Sirius B.

Dans un grand télescope, Sirius B n'est pas très difficile à voir, sauf lorsqu'elle est très près de Sirius A aux époques de son périhélie, vers les années 1945 et 1995 par exemple. Sirius B peut même être photographiée avec quelques précautions particulières (cliché de l'Observatoire de Lick). La séparation angulaire de Sirius B par rapport à Sirius A peut atteindre 12" à l'apogée.

Sirius A et B, et leur distance au Soleil permettent de déterminer la masse de chaque composante avec une grande précision.

$$M_A = 2,143 M_{\odot} \quad M_B = 1,053 M_{\odot} \quad (M_{\odot} \text{ désigne la masse du Soleil}).$$

Spectre et température de Sirius B (1915)

La luminosité d'une étoile, c'est-à-dire son rayonnement global pour toutes les longueurs d'onde dépend de sa surface et de sa température effective ou température de surface.

La faible luminosité de Sirius B de 0,0025 fois celle du Soleil est compatible avec sa masse approximativement solaire et un rayon supposé solaire si sa température effective est de 1300° K. La température effective se détermine en connaissant le type spectral de l'étoile. Un spectre stellaire est l'image étalée de l'étoile par un dispositif dispersif prisme au réseau.

Sirius A, étoile naine comme le Soleil mais beaucoup plus chaude, présente les raies de l'hydrogène, sa température est de 9970° K.

Adams réussit, en 1915, à obtenir un spectre de Sirius B qui surprend pour plusieurs raisons :

- il présente, comme Sirius A, les raies de l'hydrogène,
- les raies sont très élargies.

Les raies de l'hydrogène présentes dans l'atmosphère de Sirius B impliquent une température effective de 8500° K proche de celle de Sirius A.

Rayon et densité de Sirius B (1915)

Avec une température effective de 8500° K, la faible luminosité de Sirius B ne peut s'expliquer que par une surface rayonnante très petite, d'un rayon de 0,023 R_{\odot} (R_{\odot} désigne le rayon du Soleil). Le volume de Sirius B est donc extraordinairement petit, 8 milliardièmes du volume solaire, sa densité considérable atteint 170 000 par rapport à l'eau. Un centimètre cube de matière de Sirius a une masse de 170 Kg.

Deux preuves justifient cette densité fantastique :

- 1) les raies spectrales de Sirius B sont floues et élargies comme il fallait s'y attendre pour une atmosphère dense.
- 2) Ces raies sont déplacées vers le rouge par effet d'Einstein. La théorie de la relativité prévoit en effet un décalage vers le rouge des photons (grains de lumière) émis dans un champ gravitationnel. Dans le cas de Sirius B, le décalage théorique des raies spectrales, prédit avec les valeurs de l'époque est de l'ordre de 20 kilomètres par seconde.

Avec le télescope de 2,50 m du Mont Wilson, Adams observe ce décalage et publie en 1925 le résultat de son étude : un décalage vers le rouge de 19 kilomètres par seconde. En 1928, Moore confirme la valeur d'Adams du décalage vers le rouge.

Sirius B naine blanche

Sirius B, après l'étoile 40 Eridiani, est la deuxième étoile de faible luminosité et de type spectrale caractéristique d'étoiles blanches (8500° K). On nomme de telles étoiles

des *naines blanches* car elles sont de très petites taille, blanches et chaudes. Les naines blanches se différencient des étoiles naines ordinaires, dont font partie le Soleil et Sirius A, par les surprenantes propriétés de leur matière hyperdense. D'après Fowler (1926) une naine blanche est une étoile qui, une fois terminées les réactions thermonucléaires par épuisement du combustible nucléaire, s'est contractée jusqu'à atteindre un rayon très petit. Sa matière est complètement ionisée, c'est-à-dire que tous les électrons sont arrachés aux atomes. La matière stellaire se trouve donc composée d'un gaz très dense de noyaux et d'électrons libres étroitement serrés les uns contre les autres. Ce gaz est appelé *gaz dégénéré* car, contrairement au gaz stellaire ordinaire, il ne dépend plus de la statistique des gaz parfaits mais de la statistique quantique. La pression devient indépendante de la température et croît très vite avec la densité. Il en résulte que les électrons du gaz dégénéré ont une énergie suffisante pour s'opposer à l'énergie gravitationnelle et rendre l'étoile stable. Chandrasekhar, en 1935, montre qu'au-dessus d'une masse critique de $1,4 M_{\odot}$, une naine blanche ne peut exister (elle s'effondre), et qu'il existe une relation masse-rayon des naines blanches. Le rayon est alors complètement déterminé à partir de la masse et de la composition chimique de l'étoile.

Rayon et température de Sirius B (1940-1971)

En 1940, Marshak construit les premiers modèles de la structure interne des naines blanches. Il démontre que les régions centrales ne peuvent contenir une quantité importante d'hydrogène. Dans le cas de Sirius B, il détermine un rayon théorique en appliquant la relation masse-rayon de Chandrasekhar pour une composition chimique d'hélium et d'éléments plus lourds : carbone et oxygène. Il aboutit à un rayon théorique de $0,009 R_{\odot}$ pour Sirius B, soit une valeur deux fois moindre que celle acceptée pour l'époque ! Avec un tel rayon, le décalage gravitationnel serait de 80 km/s et la température effective de $25\,000^{\circ}\text{K}$.

Pour vérifier le modèle de Marshak il faut donc obtenir une nouvelle série de spectres de Sirius B, il faut donc attendre des conditions d'observations favorable, c'est-à-dire l'approche de l'apogée de Sirius B vers la fin des années 60, puis obtenir des spectres non contaminés par la lumière de Sirius A.

Kodaira en 1967, puis Greenstein, Oke et Shipman, en 1971, obtiennent de nouveaux spectres de Sirius B. Les résultats sont surprenants :

- température effective $17\,000^{\circ}\text{K}$ — rayon $0,011 R_{\odot}$ d'après Kodaira
- température effective $32\,000^{\circ}\text{K}$ — rayon $0,078 R_{\odot}$ d'après Greenstein.

De plus, Greenstein trouve un décalage gravitationnel de 89 km/s. Ces résultats concordent bien avec le modèle de Marshak.

Comment expliquer alors le décalage spectral de 19 km/s trouvé par Adams et Moore, sinon par le fait que Sirius A contaminait sérieusement les spectres obtenus en 1915 et 1928. Ces auteurs trouvaient, dans le spectre de Sirius B, des raies du manganèse et du fer. Or de tels éléments sont généralement absents des spectres des naines blanches du type spectral de Sirius B.

Interludes

1. Observations étranges de Sirius

Elles se rapportent à la couleur rougeâtre de Sirius, mentionnée, à plusieurs reprises, depuis -700 ans avant J.C. jusqu'à Ptolémée en 150 après J.C. Ptolémée, dans l'Almagest, cite six étoiles brillantes rouges. Cinq de ces objets : Pollux, Bételgeuse, Aldébaran, Arcturus, Antarès, sont des géantes rouges. La sixième est Sirius !

La description de Sirius comme étoile rouge impliquerait que Sirius B était une géante rouge il y a 2 000 ans, puisque Sirius A est toujours une naine ordinaire. Conclu-

sion en contradiction avec les connaissances actuelles de l'évolution stellaire qui prédisent que la transition géante rouge - naine blanche exige environ 1 million d'années.

2. Connaissances insolites de Sirius

Elles concernent les croyances mythologiques d'une tribu africaine du Mali, les Dogons qui comptent environ 300 000 membres. En 1931, deux ethnologues français, M. Griaule et G. Dieterlen, s'installent dans cette tribu pour en étudier les mœurs. Ils gagnent la confiance des autochtones et, en 1946, M. Griaule est initié par les prêtres dogons aux mystères de leurs croyances locales. Les indigènes révèlent leur savoir étonnant concernant Sirius. D'après eux, Sirius comprend plusieurs étoiles dont une invisible, appelée *Digitaria*, orbite autour de Sirius en cinquante ans. « C'est la plus petite des choses. Elle est l'étoile la plus lourde; composée d'un métal *segala...*, telle que tous les êtres terrestres réunis ne peuvent la soulever ».

Comment les Dogons ont-ils acquis une telle connaissance de Sirius? Cela demeure un mystère. Bretcher, qui s'est penché sur ce problème, pense que des missionnaires, fort au courant de l'actualité scientifique, vers les années 30, auraient communiqué aux Dogons leurs connaissances de Sirius.

Emission X et ultraviolette en provenance de Sirius

La découverte de rayons X de basse énergie émis par Sirius reste une des découvertes les plus surprenantes de l'astronomie spatiale.

En avril 1975, les détecteurs X du satellite hollandais ANS enregistre un signal positif dans le domaine des rayons X mous, à 40 Å, correspondant à une luminosité X de 10^{18} kilowatts.

Cette observation, d'abord controversée, est pleinement vérifiée par les missions HEA01 et HEA02.

Deux tentatives d'explication de cette émission X sont rejetées : mécanisme d'accrétion et émission coronale de Sirius A. En effet, Sirius A, étant une étoile de type spectral à raies d'hydrogène, ne peut perdre de la masse qu'à un taux très faible. D'autre part, les étoiles du type spectral de Sirius A sont celles dont les possibilités d'existence coronale sont les moindres. Reste donc l'hypothèse d'une émission X en provenance de Sirius B qui pourrait être entourée d'une couronne chaude, travail théorique qui reste à faire !...

Shipman, en 1976, propose une autre explication. Le flux des radiations X proviendrait de l'émission thermique des couches atmosphériques profondes de Sirius B. En supposant une atmosphère composée essentiellement d'hydrogène pur, complètement ionisé à température effective de 32 000° K, le modèle de Shipman prévoit une photosphère rayonnante de X de température de 100 000° K qui produit une luminosité X de 10^{18} kilowatts en accord avec les observations du satellite ANS.

En 1980, Wesemaël et ses collaborateurs donnent la répartition du rayonnement en fonction de la longueur d'onde pour deux modèles constitués d'hydrogène pur ayant une gravité correspondant à celle de Sirius B, pour des températures effectives respectivement de 32 000° K (voir ci-après figure 3, courbe pointillée) et de 27 000° K (courbe en trait plein). Superposons à ces courbes théoriques les résultats des observations. Le modèle à 32 000° K est compatible avec les observations optiques (symbole L), les mesures du satellite ANS et les limites supérieures du flux ultraviolet détecté par la mission Apollo-Soyuz (symbole AS) dans quatre bandes entre 100 et 911 Å.

Mais des observations ultérieures, réalisées avec des récepteurs ultra-violet plus sensibles (désignées sur la figure 3 par les symboles CBL, BFM, S et BDK) ne peuvent s'expliquer que dans l'hypothèse d'une température de 27 000° K. Les résultats, publiés

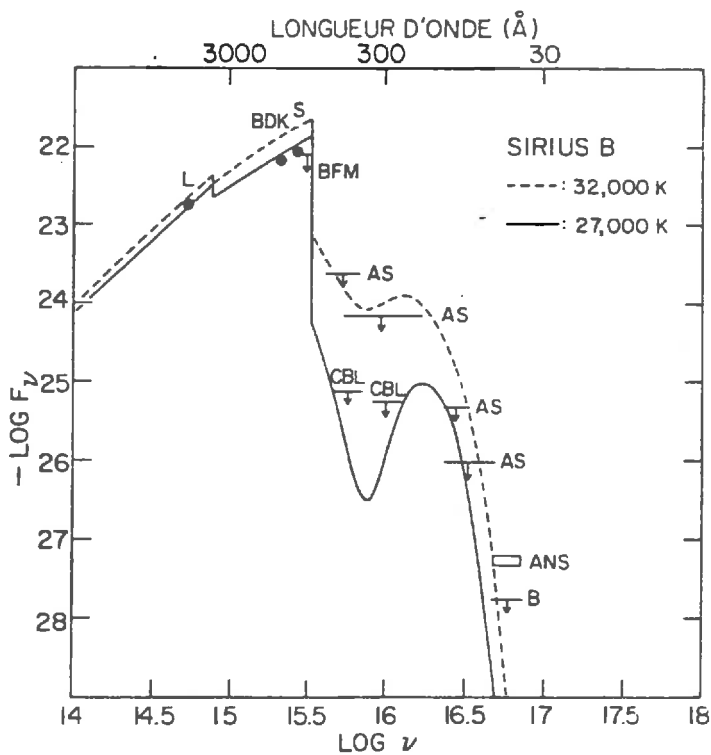


Fig. 3 - Émission du flux de modèles théoriques de l'émission thermique en fonction de la longueur d'onde.

courbe pointillée modèle de température 32 000° K

courbe en trait plein modèle de température 27 000° K

Les différents points ou traits signalés par des symboles alphabétiques correspondent aux valeurs observées (voir texte)

en mai 1984, relatifs aux spectres ultraviolets de la mission Voyager 2 conduisent également à une température de Sirius B comprise entre 26 000 et 28 000° K.

Le modèle d'hydrogène pur est, à l'heure actuelle, le seul compatible avec les récentes données optiques et ultraviolettes ; il ne peut cependant rendre compte des observations X en termes d'émission thermique.

En 1979, les observations du satellite Einstein (HEAO2) révèlent une nouvelle surprise. Grâce à son grand pouvoir de résolution, le satellite Einstein est capable de discerner la composante stellaire de Sirius, source émettrice du rayonnement X. A la surprise générale, le satellite Einstein montre que les deux étoiles sont sources X quoique la majorité du rayonnement X provienne de Sirius B.

Il nous faut attendre l'analyse des variations spectrales et temporelles de ces deux sources X, Sirius A et Sirius B, pour comprendre le mécanisme théorique qui entre en jeu. Actuellement, l'émission du rayonnement X en provenance de Sirius reste une énigme.

TRAITEMENT D'IMAGES EN ASTRONOMIE

Conférence de Monsieur G. Adam, astronome à l'Observatoire de Lyon,

C'est par un sujet un peu aride, vous semble-t-il, que se poursuit cette série de conférences. Pourquoi diable « traiter » ces magnifiques images de l'Univers que tout un chacun peut admirer dans son magazine favori ?

En fait, la question ne doit pas être posée ainsi. Les spectaculaires vues de Saturne ou de la Nébuleuse d'Orion qui vous ravissent sont pratiquement toujours le résultat de longues heures de traitement, en ordinateur ou en chambre noire. A l'habileté de l'observateur doivent nécessairement s'ajouter l'astuce et le savoir-faire des techniciens du traitement d'images. Alors, et alors seulement, toute la force et la beauté de l'image deviennent évidentes. Alors seulement, toute l'information peut être extraite par l'astronome qui exploite le cliché.

I – NÉCESSITÉ DU TRAITEMENT D'IMAGES

1. Généralités : formation des images

Il vous faut, tout d'abord, en passer par ce paragraphe aride... On sait que, pour ce qui concerne la formation des images, la lumière peut être regardée comme la propagation d'un phénomène ondulatoire. Lorsqu'on « allume » une lampe électrique, des ondes sphériques, centrées sur la lampe, s'en écartent dans toutes les directions, à 300 000 km/s. Le caillou jeté dans une mare tranquille donne une bonne image de ce phénomène. Retenons simplement qu'à très grande distance de la lampe, le rayon des ondes sphériques est tel que celles-ci peuvent localement être considérées comme des ondes planes. De même, la surface de la Terre, localement, peut être considérée comme plane, bien qu'on sache qu'il s'agisse plutôt d'une sphère de très grand rayon. Comme les « lampes » de l'astronome, les étoiles sont très éloignées, nous ne parlerons plus que d'ondes planes.

Le rôle du télescope, ou de tout autre instrument destiné à former une image, est de transformer les ondes planes, venues d'une source lumineuse ponctuelle, en ondes sphériques convergentes. Toute la lumière se regroupe finalement en un point de l'image de la source ponctuelle. Si l'on forme l'image de la Lune, chaque point de l'objet donne ainsi une image et la réunion de toutes ces images ponctuelles constitue l'image proprement dite de la Lune.

Cette vue théorique idéale est déjà compliquée par un phénomène nommé diffraction qui fait que l'image d'un point lumineux ne peut pas être un point. Il s'agit en fait d'une figure complexe, formée d'une tache centrale entourée d'anneaux de brillance décroissante : la figure de diffraction d'Airy, du nom d'un physicien anglais. Contre cela, il n'y a pas de parade possible. On cherche simplement à utiliser des télescopes de diamètre de plus en plus grand, ce qui a pour effet de diminuer le diamètre de la tache centrale. Les images de points sont donc de plus en plus proches de la forme ponctuelle, et les images complexes de plus en plus fines et détaillées. Malheureusement, tout ceci est encore trop optimiste : un télescope de grand diamètre n'atteint jamais son pouvoir séparateur théorique. Il se produit encore diverses dégradations de l'image, que les paragraphes suivants passent rapidement en revue.

2. Dégradations dues à l'atmosphère

Chacun a fait l'expérience, en été, des lointains qui tremblent dans la chaleur de midi, comme disaient nos lectures d'écolier. Cette agitation provient simplement du long trajet des rayons lumineux dans une atmosphère hétérogène. Dans ce cas, il s'agit de

l'agitation atmosphérique due aux courants de convection à basse altitude. Ce sont ces mêmes courants qui brassent l'eau d'une casserole placée sur le feu. L'astronome n'échappe pas à cet effet qui existe aussi la nuit, hélas. L'atmosphère est un milieu dynamique, en perpétuelle évolution, toujours agité. Le résultat pratique est que les ondes lumineuses issues d'une étoile lointaine, qui étaient planes avant d'entrer dans l'atmosphère, présentent à l'entrée dans le télescope l'aspect d'un vieux couvercle de poubelle. Les bosses ou les creux qui déforment les surfaces d'onde ont un écartement moyen voisin d'une vingtaine de centimètres. On peut pratiquement considérer alors que chaque portion d'une vingtaine de centimètres de la surface d'onde va se comporter comme une petite onde plane, d'inclinaison différente de celle de sa voisine, et indépendante de celle-ci. Si le diamètre du télescope est notablement supérieur à vingt centimètres, plusieurs creux ou bosses de l'onde pénétreront de front dans l'instrument. Toutes ces portions d'onde vont donner autant d'images élémentaires distinctes et la sage figure d'Airy va se métamorphoser en un abominable paquet bouillonnant plusieurs fois plus gros. Chacun des « grains » fugitifs qui composent ce paquet s'appelle une « tavelure » (speckle en anglais). Il est important de noter tout de suite que, si le diamètre du paquet bouillonnant est en général très supérieur à celui de la figure d'Airy du télescope, le « diamètre » des tavelures, lui, correspond à celui de cette figure théorique. En clair, si on observe à l'œil l'image de Jupiter au moyen d'un télescope de quatre mètres, on n'y voit, en général, pas de détails notablement plus fins que dans un télescope de vingt centimètres ! Voilà qui va rassurer les astronomes amateurs... Il arrive toutefois que, pendant une seconde, l'atmosphère présente une structure « simple » entre Jupiter et le télescope, et que l'œil bénéficie alors pleinement du pouvoir de résolution du grand instrument. De tels instants sont essentiellement fugitifs et savoir les saisir au vol était tout l'art des grands observateurs du siècle dernier. Heureusement pour la science, leur mémoire visuelle et leurs dons graphiques leur permettaient ensuite de conserver par le dessin ces images idéales. Plus près de nous, des méthodes de très courtes poses photographiques ont été employées avec succès.

3. Dégradations dues à l'appareil

Le télescope n'est, finalement, que l'entonnoir utilisé par l'astronome pour ramasser un maximum de lumière. L'appareil le plus intéressant est souvent celui qui suit le bec de l'entonnoir en question. Ce peut, mais c'est de plus en plus rare, être tout simplement l'œil. Dans ce cas, nous ne dirons rien des problèmes liés à l'utilisation de ce prodigieux instrument. L'œil n'ayant pas, à proprement parler, de mémoire, et celle que nous avons des images perçues étant essentiellement subjective, il a fallu inventer des instruments auxiliaires capables de recevoir et de stocker des images. Donc, en général, le télescope est suivi d'un appareil enregistreur. L'expérience montre alors que l'ensemble télescope + appareil enregistreur auxiliaire dégrade encore une image qui n'en demandait pas tant. Les dégradations, que l'on appelle distorsions, sont très schématiquement de deux types :

– *Distorsions géométriques*

Chacun a tenté de photographier un monument élevé en dirigeant l'objectif de son appareil vers le haut et a pu observer un bel ensemble d'une telle distorsion : sur le cliché, le gratte-ciel se trouve métamorphosé en un cure-dents surréaliste, avec un bout plus pointu que nature fiché tout là-haut dans les nuages. Cette déformation est due à un effet de perspective dépendant de la focale de l'objectif utilisé. Un autre exemple de distorsion géométrique simple s'obtient en tripotant inconsidérément les réglages placés à l'arrière d'un téléviseur : on étire la speakerine dans un sens ou dans l'autre. Il existe des distorsions géométriques beaucoup plus complexes et plus difficiles à corriger.

Il s'agit là de distorsions qui affectent non pas les dimensions mais la brillance de l'image. On distingue, sur celle-ci, des zones trop sombres et des zones trop claires qui n'existaient pas dans l'objet observé. Un bon exemple d'image présentant des distorsions photométriques est fourni par une photo qui a « pris un coup de jour » (on a imprudemment ouvert le boîtier avant la fin du film). On a une photo marquée de taches claires dues à des reflets dans l'objectif. En manipulant le boîtier d'équilibre des couleurs d'un téléviseur, on obtient des images à dominante colorée qui fournissent un autre exemple de distorsion photométrique.

4. Dégradations dues à la transmission

Dans le cas d'expériences spatiales, un problème supplémentaire est à résoudre : comment transmettre l'image observée, disons au voisinage de Jupiter, jusqu'aux astronomes qui l'attendent sur terre ? Ce problème technologique a été résolu mais au prix de l'introduction d'une distorsion supplémentaire, le « bruit ».

Un très bon exemple de bruit ajouté à une image peut être observé lorsqu'un orage sévit à quelque distance d'un ré-émetteur TV. On dit que l'image est pleine de « neige » de petits points brillants. C'est un bruit, au sens électronique du terme.

Comment peut-on transmettre une image par radio, à des milliards de kilomètres ? On doit, pour cela, utiliser une transmission numérique, c'est-à-dire transformer l'image en une suite de nombres qui permettront, à l'arrivée, sa reconstruction.

Pour une image noir et blanc, par exemple, on procède ainsi : on divise l'image au moyen d'un très fin quadrillage. Chaque minuscule carré est appelé « élément d'image » ou « pixel ». On mesure alors la brillance moyenne de chaque pixel qui va être représenté par un nombre : par exemple, 0 pour un pixel éteint, noir, et 100 000 pour le plus brillant, avec des valeurs intermédiaires pour les autres. Il ne reste plus qu'à expédier, par radio, la suite de ces nombres, dans un ordre convenu. A l'arrivée, un ordinateur va automatiquement reconstruire, point par point, l'image que l'on affichera sur un écran TV. On n'a rien fait d'autre, fondamentalement, que d'appliquer la technique millénaire de la mosaïque. Si les pixels – les carreaux de la mosaïque – sont assez petits, on aura l'impression d'une image continue. De même, les photographies, publiées par les journaux, semblent « normales » alors qu'une simple loupe permet de distinguer les éléments d'image (des points ronds de diamètre variable, dans ce cas) qui constituent le cliché.

Pratiquement, ces très longues suites de nombres qui voyagent jusqu'à la Terre, sont accompagnées d'une foule d'autres informations de synchronisation destinées à permettre à l'ordinateur « de s'y retrouver ». Tout cela voyage sous forme binaire, c'est le bip-bip des satellites. Pendant l'immense parcours interplanétaire, certains signaux se perdent, des parasites s'ajoutent. A l'arrivée, l'image est pleine de neige (les parasites) et certaines zones manquent (des signaux de synchronisation ont été perdus, l'ordinateur récepteur ne retrouve plus son compte !).

II – LE TRAITEMENT

1. Elimination du bruit

A priori, rien ne distingue un « bip » de bruit, d'origine parasitaire, d'un bip de l'image. Comment faire pour que l'ordinateur, à la demande de l'observateur, soit capable de tirer les détails réellement observés et d'éliminer le bruit.

Il faut, à ce point, introduire la notion de « fréquence spatiale ». Ce terme barbare recouvre quelque chose de très simple en fait. Imaginez un panorama désertique où de

grandes dunes occupent tout le paysage. Tout est en courbes douces et amples ; une telle image est riche en basses fréquences spatiales, pauvre en hautes fréquences. Imaginez ensuite une photographie d'une séance animée à l'Assemblée nationale. Une foule de minuscules détails sollicite votre attention : cette image est riche en hautes fréquences spatiales, au contraire.

Il se trouve, très schématiquement, que le bruit de transmission est souvent un bruit à haute fréquence spatiale (les « flocons de neige » sont petits et nombreux sur l'écran TV). On dispose de méthodes mathématiques permettant de filtrer et d'éliminer ces hautes fréquences. On peut donc se débarrasser de ces parasites-là. Ce n'est pas sans risque car on détruit, du même coup, les détails de l'image qui ont à peu près les mêmes dimensions que les « flocons de neige » ! A l'observateur de juger les limites à imposer au filtrage.

Bien sûr, la situation est souvent plus compliquée : le bruit peut être à basse fréquence, ou périodique, etc... Diverses méthodes permettent un filtrage adapté à chaque cas.

2. Élimination des erreurs de transmission

Cette fois, les signaux de synchronisation ont été partiellement détruits. Concrètement, le récepteur ne sait plus où commencent certaines lignes de l'image. Certaines lignes peuvent même avoir totalement disparu. Tout a été enregistré à l'arrivée mais certaines lignes semblent inexploitable, incompréhensibles.

Les enregistrements sont de longues suites de 0 et de 1 car tout est codé en binaire. Il faut alors rechercher « à la main » ou par des méthodes mathématiques où pourraient se trouver les signaux disparus. On arrive ainsi à récupérer, au moins en partie, les zones incompréhensibles. Lorsque de petites zones manquent, il est parfois possible de les restaurer en « devinant » ce qu'elles devaient être par continuité, à partir des zones voisines. On entre là en terrain glissant, bien sûr !

3. Correction des distorsions

Il s'agit d'appliquer à l'image une transformation géométrique lui redonnant une forme plus satisfaisante et une transformation photométrique assurant un « rendu » correct des brillances et des couleurs.

Les distorsions proviennent parfois de la conception même de l'appareil enregistreur. Dans ce cas, les transformations nécessaires sont connues depuis la construction et ont été confirmées par des tests intensifs, exécutés avant le départ de la sonde spatiale, par exemple. On ne rencontre donc pas de difficulté particulière dans ce cas précis.

Les distorsions peuvent aussi provenir d'une évolution inconnue de l'appareil ou de problèmes de transmission. On peut alors utiliser une méthode de mire dont le principe est le suivant : on pointe, par télécommande, l'appareil sur quelque chose dont on connaisse bien la forme, la couleur, etc. Il ne reste, au moment de l'étude de l'image, qu'à lui faire les transformations voulues pour qu'elle représente exactement un objet identique que l'on a conservé à titre de témoin. Par exemple, les sondes Viking qui se sont posées sur Mars disposaient de mires colorées que l'on pouvait pointer avec leurs caméras de télévision. En comparant l'image obtenue avec une mire identique conservée sur Terre, on en déduisait les corrections photométriques à apporter à l'image. Il s'agit là d'une méthode tout à fait analogue à celle qu'emploie un réparateur télé pour régler un poste à domicile, sur la mire diffusée hors des émissions « actives ».

Des distorsions photométriques peuvent apparaître en astronomie du fait de la présence, dans le champ de visée, ou juste à l'extérieur, d'un astre brillant malencon-

treusement proche de l'objet étudié. Le récepteur est alors « ébloui » et l'image est voilée irrégulièrement. Connaissant l'éclat de l'astre perturbateur et sa position par rapport à l'axe de visée, on en déduit le « voile » théorique que l'on élimine mathématiquement par soustraction au niveau de chaque pixel. On retrouve ainsi une image nettoyée, proche de celle que l'on aurait en absence de perturbation.

4. Extraction de détails

Très souvent, dans un cliché astronomique, on s'intéresse à un aspect bien précis de l'objet. Par exemple, on cherche à étudier les filaments gazeux de la Nébuleuse du Crabe. Le voile nébuleux général noie les filaments sur le cliché et gêne l'exploitation. On se trouve là devant un problème inverse de celui posé par l'élimination du bruit puisque l'on cherche, en fait, à isoler, pour les conserver, les hautes fréquences spatiales (dues aux filaments) en éliminant les basses fréquences (le voile général).

Pour changer, nous ne parlerons que d'une seule méthode, pas du tout électronique, adaptée aux photographies classiques. Notons qu'une méthode identique dans le fond, mais mathématisée, est applicable aux images numérisées.

Il s'agit simplement de superposer exactement (là est le problème...) un cliché négatif parfaitement au point et un cliché positif volontairement défocalisé, « pas net ». Sur ce dernier cliché, les détails fins et contrastés ont disparu du fait de la mauvaise mise au point mais le voile diffus est peu affecté. En termes mathématiques, les hautes fréquences spatiales ont disparu, ne laissant que les basses fréquences, d'où l'aspect très « doux » du cliché. Par superposition du positif et du négatif, les basses fréquences vont donc s'annuler en moyenne, seules resteront les hautes fréquences spatiales. Sur un portrait traité avec cette technique, par exemple, les cheveux restent très évidents, le visage est réduit aux contours.

5. Amélioration de la lisibilité

Outre les techniques esquissées plus haut, celle des isophotes ou des isodensités est la plus utilisée. Elle consiste à remplacer l'image « artistique » initiale par une carte constituée par les « lignes de niveau » de l'image. Pour cela on procède par exemple ainsi : on détermine quel est le pixel le plus brillant ; on trace alors des lignes joignant tous les pixels dont la valeur est 90 % de cette valeur maximale. En fait, la méthode est mathématiquement plus complexe car on exige en plus que ces lignes soient des courbes fermées telles que, en gros, tous les pixels situés à l'intérieur aient une valeur supérieure à 90 % de la valeur maximale. Puis on recommence pour 80 %, puis 70 %, etc.

On obtient ainsi les courbes de niveau de brillance de l'image. L'avantage de la chose, c'est que la forme de l'objet qui, en dernier ressort, est fixée par ces courbes de niveau, est ainsi objectivée et ne dépend plus de l'appréciation subjective de l'observateur. On peut alors, en toute confiance, se livrer à des traitements mathématiques sur la forme de l'objet. Notons que, pour des questions de clarté d'affichage, on utilise autant que possible une visualisation colorée. En donnant des couleurs conventionnelles aux zones comprises entre les diverses courbes de niveau, on évite la confusion d'une image complexe en noir et blanc.

Les images obtenues sont, de plus, splendides, ce qui ne gâte rien...

6. La lutte contre l'atmosphère : traiter le mal à la source

Nous abordons là une méthode ultime de traitement d'image. On a vu que l'atmosphère terrestre, par son agitation incessante, impose de sérieuses limitations à la résolution des télescopes. Cette limitation semble vraiment inévitable. Eh bien non ! Là encore il faut tenter d'exploiter toutes les informations dont on dispose : lorsqu'on

observe une étoile, on sait parfaitement que l'onde, à l'entrée du télescope, devrait être plane. Elle ne l'est pas parce que l'atmosphère l'a déformée. Si on parvenait à observer la forme de l'onde, avec ses creux et ses bosses, et à la redresser avant qu'elle forme l'image, on retrouverait le pouvoir séparateur théorique de l'instrument et des images parfaites. Est-ce techniquement réalisable ? La réponse est oui, cela existe, cela marche.

Par des procédés interférentiels, on détermine la forme de l'onde à l'entrée du télescope, on calcule la déformation à appliquer au miroir (une bosse en face d'un creux, un creux en face d'une bosse de la surface d'onde) pour que l'onde réfléchie soit « parfaite ». On s'arrange alors pour que, lorsque l'onde déformée arrive sur le miroir, celui-ci soit déformé aussi, en sens inverse. Et le tour est joué... C'est ce que l'on appelle le « miroir en caoutchouc ». Il s'agit en fait d'un miroir réalisé dans un matériau assez classique, du métal par exemple, et supporté par une multitude d'éléments piézo-électriques commandés par le dispositif interférentiel placé à l'entrée du télescope. Les éléments piézo-électriques s'allongent ou se contractent, imposant ainsi au miroir les déformations nécessaires.

On sait faire cela, mais sur de tout petits miroirs, et en perdant beaucoup de lumière dans des dispositifs annexes. La méthode ne fonctionne, pour l'instant, que pour des observations du Soleil ! On aura une idée de la rapidité de l'électronique de calcul et de positionnement en se souvenant que l'onde déformée qui est analysée par le dispositif détecteur à l'entrée du télescope arrive sur le miroir un centième de microseconde plus tard ! Pendant ce temps, il faut avoir analysé l'onde, calculé la déformation nécessaire pour le miroir et positionné celui-ci...

L'astronomie spatiale fera-t-elle disparaître cette technique naissante ? Certes pas : un télescope en orbite coûtera, pour longtemps, bien trop cher pour que toute l'astronomie soit faite dans l'espace. Et puis, sur Terre, il y aura toujours une foule de circonstances où l'on souhaitera obtenir, en visée horizontale, les performances théoriques, donc maximales, de l'optique. Demandez aux militaires...

7. Voir l'invisible

Il nous reste à dire un mot des techniques de visualisation appliquées à autre chose que la lumière. Chacun connaît la radiographie (sur film) et la radioscopie (sur écran) médicales qui nous montrent des « images » d'objets invisibles pour l'œil.

L'astronomie utilise largement ces techniques de visualisation. En dernier ressort, une image n'est qu'un tableau de nombres, chacun donnant la « valeur » d'un des pixels. Rien n'empêche de mettre ce tableau dans une mémoire d'ordinateur et de l'afficher sur un écran cathodique, en décidant que tous les pixels dont la valeur est comprise entre 0 et 10 sont bleus, ceux dont la brillance est entre 11 et 20 sont verts, etc. On obtient ainsi une image en « fausses couleurs ». Celles-ci sont en effet tout à fait arbitraires puisque fixées par l'utilisateur. L'image colorée est tout à fait équivalente au tableau numérique de départ, mais combien plus facilement exploitable ! On tire alors pleinement avantage des capacités d'analyse globale de l'ensemble œil-cerveau et on obtient instantanément une synthèse qui résulterait, sinon, de longues heures de calcul automatique.

C'est ainsi que l'on dispose d'images « radio » de radio-galaxies, d'images en rayons X d'amas globulaires, d'images infrarouge lointain d'étoiles froides, d'images « thermographiques » du Soleil ou des planètes donnant la répartition des températures. On dispose même d'images détaillées de la surface d'étoiles comme Bételgeuse, obtenues par interférométrie des tavelures dans l'infrarouge. Alors ceci est une autre histoire.

APPLICATION DES MICROPROCESSEURS EN ASTRONOMIE

*Conférence de Monsieur Dubet, responsable du service électronique
de l'Observatoire de Lyon, le 26 mars 1983*

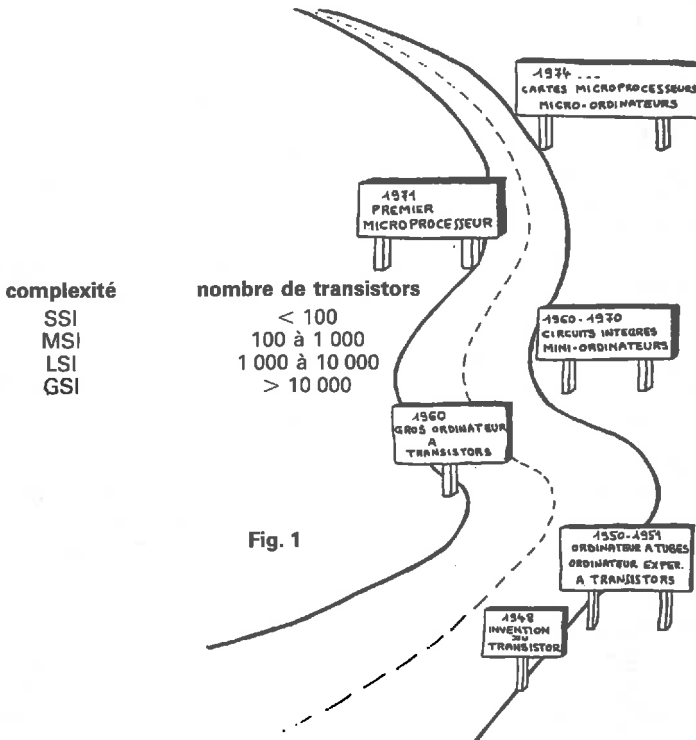
Introduction

L'avènement des microprocesseurs engendre une nouvelle génération d'instruments, que ce soit dans le monde scientifique dont fait partie l'Astronomie, ou que ce soit dans le monde de la consommation, au niveau de l'automobile par exemple. Ces produits sont plus performants, plus souples d'emploi, plus compacts et souvent moins onéreux que ceux de la génération précédente. Leur impact s'avère de plus en plus important. En Astronomie, leur faible coût et leur flexibilité en font des outils universels puissants pour la commande de nombreux instruments.

Mutation en électronique (fig. 1)

Les transistors ayant pris le pas sur les lampes, les techniques d'intégration évoluant, on a vu apparaître des circuits dits « intégrés » qui rassemblent un nombre de plus en plus important de composants électroniques :

complexité	Nombre de transistors	Nombre de portes
SSI	< 100	1 à 10
MSI	100 à 1 000	10 à 100
LSI	1 000 à 10 000	100 à 1 000
GSI	> 10 000	> 1 000



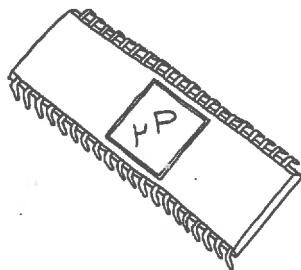
On a vu ainsi la réalisation d'un nouveau type de composant, le « microprocesseur » dont l'impact est spectaculaire. Les premiers microprocesseurs ont fait leur apparition en 1972, en France en 1974.

Le prix d'un microprocesseur était de 3 000 F de l'époque en 1975, il est aujourd'hui de 70 F.

Les microprocesseurs (fig. 2)

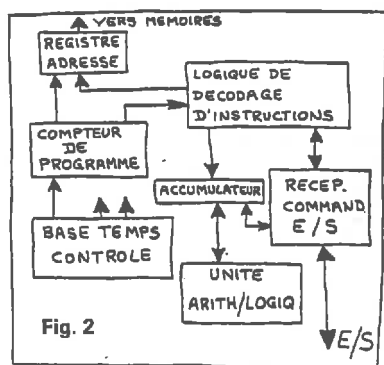
1. Le microprocesseur

C'est un circuit LSI équipé de fonctions d'unité arithmétique et logique (ALU) et de celles d'une unité de commande. C'est la partie active du micro-ordinateur qui se compose de plusieurs sous-systèmes en liaison avec une ou des mémoires dont la mission est de stocker des instructions et des données afin de les restituer à la demande. Actuellement certains microprocesseurs prévus pour des applications en grande série intègrent en eux-mêmes ces mémoires.



Technologie. — Toutes les technologie actuelles de circuits intégrés recourent au silicium. Il existe deux grands types de transistors : les bipolaires et les MOS qui résultent de l'association judicieuse de silicium dopé N et P. Dans les applications aux microprocesseurs, les principales familles de circuits intégrés sont

Technologie. — Toutes les technologie actuelles de circuits intégrés recourent au silicium. Il existe deux grands types de transistors : les bipolaires et les MOS qui résultent de l'association judicieuse de silicium dopé N et P. Dans les applications aux microprocesseurs, les principales familles de circuits intégrés sont



2. Les mémoires

2.1. La mémoire centrale

Ce sont des circuits ayant pour fonction de stocker de manière temporaire ou permanente des instructions ou des données. Il existe fondamentalement deux types de mémoires autour du circuit microprocesseurs :

– Les mémoires vives (RAM) à accès aléatoire pouvant aussi bien être enregistrées (écriture)

que lues en service (mémoires volatiles) ;

– Les mémoires mortes (ROM) à accès aléatoire pouvant être seulement lues.

Dans ces mémoires, le contenu est inaltérable. On les utilise pour stocker des tables, pour générer des caractères, etc.

2.2. Les mémoires de masse

Ce sont des unités périphériques au microprocesseur destinées à stocker des informations obtenues après traitement ou acquisition par le microprocesseur. On trouve les perforateurs de rubans, les unités de cassettes, les unités de disques souples, etc.

3. Les circuits périphériques

Le microprocesseur est en liaison avec des éléments extérieurs que l'on appelle des « périphériques ». Avec ces éléments, il échange des informations ou des ordres. Pour que le dialogue soit possible, il est nécessaire d'établir un interface qui l'adapte en un langage compréhensible et par le microprocesseur et par le périphérique.

Les circuits périphériques sont de types très variés :

- imprimante
- écran de visualisation
- afficheurs numériques
- claviers
- voyants
- relais
- moteurs
- solénoïdes
- etc.

4. Architecture d'un microcalculateur (fig. 3)

Le circuit microprocesseur couplé avec des éléments externes engendre un microcalculateur.

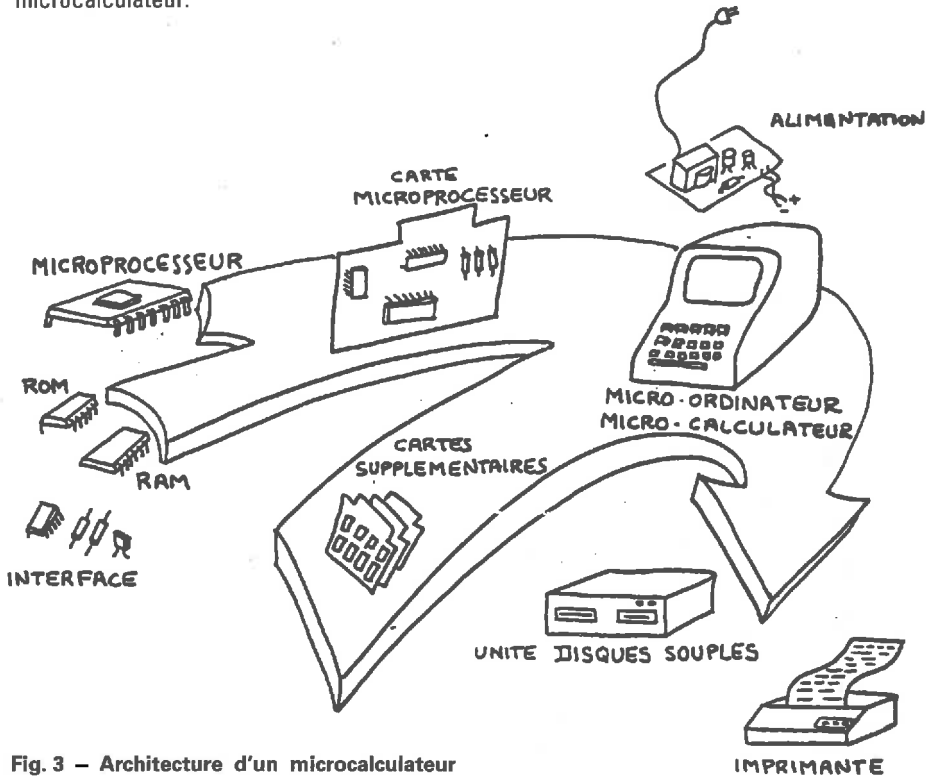


Fig. 3 - Architecture d'un microcalculateur

Fondamentalement, ce microcalculateur est constitué par :

- 1 circuit microprocesseur,
- 1 ou plusieurs mémoires RAM,
- 1 ou plusieurs mémoires ROM,
- 1 alimentation,
- 1 clavier,
- 1 écran de visualisation

- 1 chassis,
- 1 ou plusieurs circuits d'entrées-sorties,
- 1 mémoire de masse (disquette, cassette, bande magnétique, etc.).

Fonctionnement des microprocesseurs

- Lorsqu'un microprocesseur est en fonctionnement, on peut distinguer deux cas :
- il exécute des opérations internes,
 - il dialogue avec le monde extérieur.

Le premier cas concerne essentiellement la « puce » de silicium, le second peut être un dialogue avec la mémoire, un dialogue avec les organes périphériques, etc.

1. Opérations internes

La suite des opérations dans un microprocesseur est déterminée par un programme. Un programme se compose d'une suite d'instructions et de données. Chaque instruction est stockée dans la mémoire centrale du microcalculateur sous la forme d'un code numérique approprié. L'ensemble des instructions d'un microcalculateur peut comprendre des instructions logiques, des instructions de chargement, des instructions de stockage, des instructions arithmétiques, des instructions de saut et des instructions d'entrées-sorties.

2. Logique de calcul et de commande (fig. 4)

Les microprocesseurs utilisent les chiffres 0 et 1. Les règles des opérations arithmétiques sont semblables à celles du système décimal à part le fait que le système binaire utilise un ensemble de deux chiffres binaires (0, 1) au lieu d'un ensemble de dix chiffres décimaux (0, 1, ..., 9).

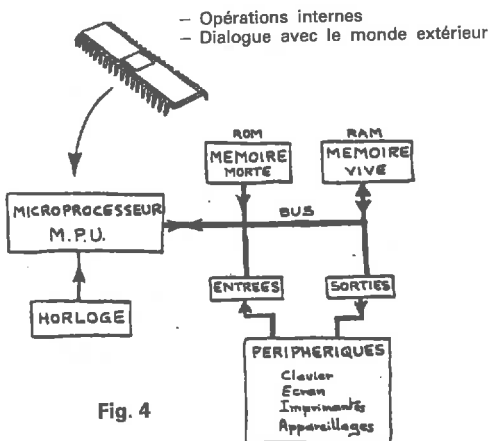


Fig. 4

Base 10	Base 2
0	0
1	1
2	10
3	11
4	100
5	101
6	110
7	111
8	1000
9	1001
10	1010

Exemple : 6 800 μ P : 8 bits DONNÉES
16 bits ADRESSES
 2^{16} \diamond 64 000 combinaisons

Exemple d'addition :

4	\diamond	100
+ 6	\diamond	110
10 ₁₀	\diamond	1010 ₂

La suite de cet article vous sera présentée dans notre prochain numéro.

Imprimerie du Centre Régional de Documentation Pédagogique de l'Académie de LYON
47-49, rue Philippe-de-Lassalle - 69316 LYON Cédex 04
Dépôt légal : 1^{er} trimestre 1986 - N° de la publication : 20126/400 - Le Directeur : D. SONDAZ

Société Astronomique de Lyon

69230 — *Saint-Genis Laval*

S O M M A I R E

- 1 Sirius et sa mystérieuse naine blanche.
par Madame M.T. Martel, astronome à l'Observatoire de Lyon, le 10 novembre 1984.
- 7 Traitement d'images en astronomie.
par Monsieur G. Adam, astronome à l'Observatoire de Lyon.
- 13 Application des microprocesseurs en astronomie.
par Monsieur Dubet, responsable du service électronique de l'Observatoire de Lyon, le 26 mars 1983.

PRIX : 10 F