

J. GALMICHE

**Observateurs et observations : analyse de
mesures effectuées par le groupe astrolabe
de l'observatoire de Paris**

Les cahiers de l'analyse des données, tome 14, n° 2 (1989),
p. 175-202

http://www.numdam.org/item?id=CAD_1989__14_2_175_0

© Les cahiers de l'analyse des données, Dunod, 1989, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Les cahiers de l'analyse des données » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

OBSERVATEURS ET OBSERVATIONS: ANALYSE DE MESURES EFFECTUÉES PAR LE GROUPE ASTROLABE DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS

[ASTROLABE]

*J. GALMICHE**

0 Introduction: observateurs et observations

Quelle est la position exacte d'un lieu d'observation? Quelle est l'heure précise d'une observation? Questions de toujours, toujours fondamentales pour les astronomes, questions d'actualité pour l'astrométrie contemporaine, confrontée à l'étude des mouvements des satellites artificiels et aux informations qu'ils transmettent, sollicitée par les organismes internationaux qui ont la charge de recueillir les résultats de toutes provenances.

À partir de données fournies par l'Observatoire de Paris et dont la finalité est de contribuer à apporter des réponses à ces questions, il nous a été possible de découvrir un aspect de l'astrométrie, celle des années 1979-1982.

L'étude statistique de ces données s'est faite dans deux directions.

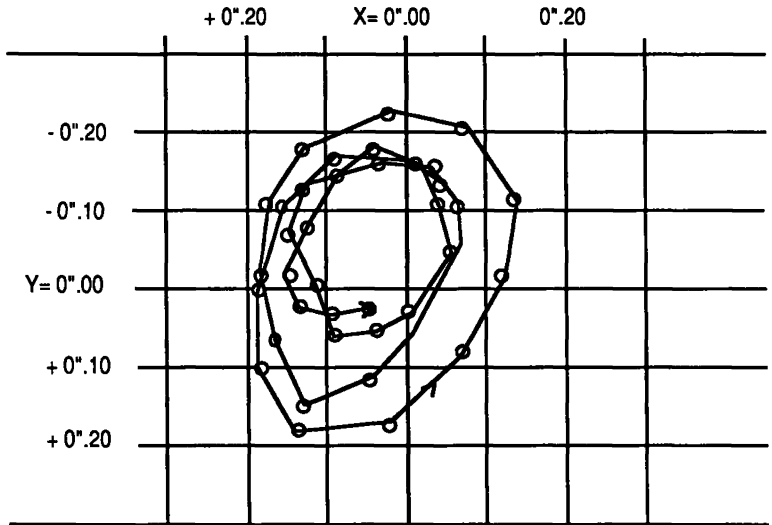
La première est spécifiquement astronomique. Par exemple, des analyses suggèrent un lien entre la précision des mesures et la saison d'observation, ou encore, un lien entre cette précision et l'heure d'observation; c'est ce dernier point qui sera développé au §4.

La seconde dépasse le cadre propre des données. Aux mesures, se sont peu à peu substitués ceux qui les effectuent; et, à l'étude astrométrique, on a pu en ajouter une autre, à la frontière du domaine psychologique ou ergonomique, celle de la façon de faire de ceux qui observent. Au fur et à mesure des analyses,

(*) Docteur de 3-ème cycle en statistique. Lycée Léon Bourgeois, 51200, Épernay.

L'auteur exprime sa profonde gratitude à S. Débarbat, astronome titulaire à l'Observatoire de Paris, qui a mis à sa disposition les données de la présente étude. Ses conseils, ainsi que ceux de F. Chollet, astronome adjoint à l'Observatoire de Paris, l'ont accompagné tout au long de ses recherches.

La polhodie du début de 1931 à la fin de 1934;
Danjon, Astronomie générale.



on a découvert que les comportements des observateurs étaient très différents les uns des autres.

D'autres peuvent, eux aussi, organiser leur travail et l'imprégner de leur personnalité. La méthode utilisée dans cette étude est susceptible de s'étendre à d'autres secteurs que l'astrométrie. C'est pourquoi, sans respecter l'ordre de notre démarche, les analyses qui conduisent à la recherche du comportement des observateurs seront exposées en premier lieu, aux §§2 et 3, immédiatement après la description des données.

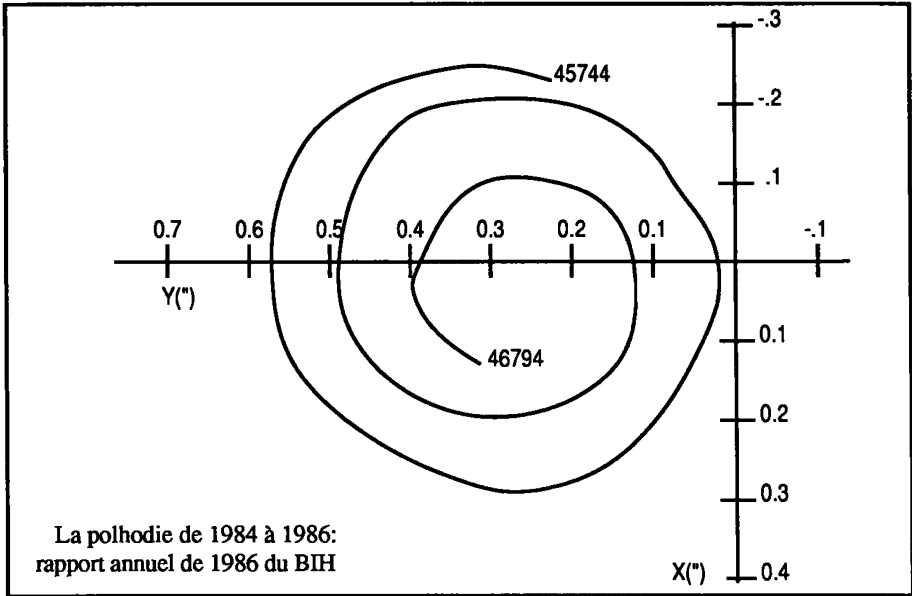
1 Du problème astrométrique aux données statistiques

1.1 Thème des recherches du groupe "Astrolabe"

En étudiant les variations de la latitude en différents lieux déterminés et en comparant les temps astronomiques obtenus dans les observatoires du monde entier avec les temps d'horloges "physiques", on a pu constater que la rotation de la Terre n'était pas parfaitement uniforme et qu'elle ne s'effectuait pas autour d'un axe fixe.

Les phénomènes de précession et de nutation qui affectent ce qu'on appelle l'axe du monde, c'est-à-dire l'axe du mouvement diurne des étoiles, sont connus avec un haut degré de précision.

Cet axe, qui est de fait celui des pôles terrestres, ou axe instantané de rotation de la Terre, a, d'autre part, relativement à la Terre, un mouvement de faible amplitude: le pôle décrit, sur la Terre, une courbe aléatoire, appelée la



polhodie, (d'après une locution grecque qui signifie: "la voie du pôle"), cette courbe apparaît contenue, jusqu'à présent, dans un carré de 30m de côté (cf. figures).

Pressenti par Euler, ce mouvement a été confirmé par les travaux de Chandler, astronome à l'Observatoire de Harvard, à la suite d'observations effectuées de 1890 à 1898. Certaines de ses composantes ont reçu une explication: terme annuel, semi-annuel...

Cependant, la Terre n'étant pas rigide, il reste des composantes imprévisibles dont le caractère aléatoire rend nécessaire une surveillance rigoureuse et constante de l'ensemble du mouvement.

Au groupe Astrolabe du Département d'Astronomie Fondamentale de l'Observatoire de Paris, on a déterminé, dès 1956, avec un astrolabe de Danjon, la latitude instantanée du lieu d'observation ainsi que le Temps Universel UTO, temps qui caractérise la rotation de la Terre et prend en compte le mouvement du pôle terrestre.

Ce département, comme aussi une quarantaine d'autres stations a, ainsi, apporté sa contribution aux travaux de deux organismes internationaux: le Bureau International de l'Heure (BIH) dont le siège est à l'Observatoire de Paris, et l'International Polar Motion Service (IPMS) , localisé à l'Observatoire de Misuzawa.

1.2 Méthodes et instruments

1.2.1 Méthode des hauteurs égales

La méthode mise en place à l'astrolabe est celle des hauteurs égales: la détermination du temps et celle de la latitude se font à partir de l'observation de passages d'étoiles à la même hauteur.

L'originalité de cette méthode réside dans l'obtention des résultats à l'aide d'une seule mesure pour chaque étoile, celle de l'instant de son passage à la hauteur fixée instrumentalement. À partir de ces instants, on détermine la latitude instantanée du lieu d'observation, le temps UTO ainsi que le rayon, terme qui désigne $-\Delta z$, z étant la distance zénithale;

$$\Delta z = z - z_0 ; \text{ avec, à Paris : } z_0 = 30^\circ 00' 34''.$$

Le mot rayon est un terme astronomique qui provient d'une méthode graphique, très expéditive lorsqu'on ne dispose pas d'un ordinateur, où z est le rayon d'un cercle tangent à un ensemble de droites que l'observateur peut tracer après un minimum de calculs. Du point de vue mathématique, il s'agit de trouver la meilleure solution approchée d'un système d'équations comportant plus d'équations que d'inconnues. À cet effet, on emploie la méthode de Gauss des moindres carrés.

1.2.2 Astrolabe de Claude et Driencourt

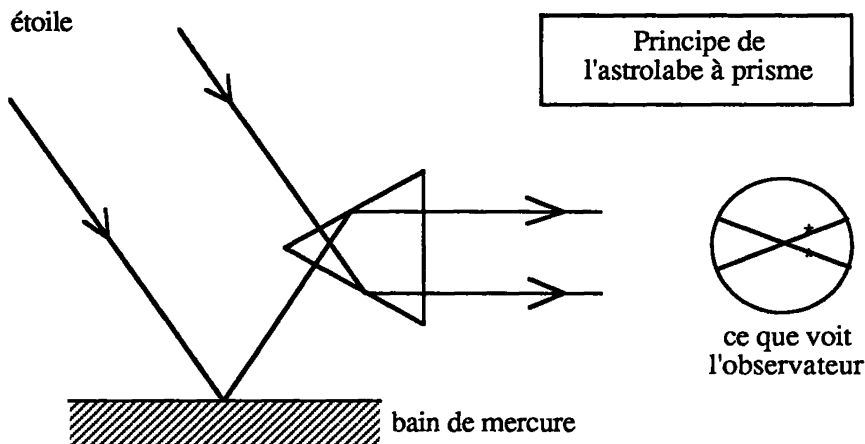
Un instrument de hauteurs égales a été conçu et mis au point entre 1900 et 1905 par A. Claude, calculateur au Bureau des Longitudes, et L. Driencourt, ingénieur hydrographe en chef de la Marine. Cet instrument comporte un prisme. L'image d'une étoile réfléchiée par celui-ci et l'image de cette même étoile réfléchiée deux fois, par le bain de mercure et par le prisme, se déplacent en sens inverse et coïncident lorsque l'étoile observée est à une distance zénithale de 30° , angle défini par le prisme. L'observateur note l'instant de la coïncidence.

1.2.3 Astrolabes de l'Observatoire de Paris

L'instrument utilisé, pour la période analysée, est un astrolabe à pleine pupille assurant la continuité avec les observations antérieures faites avec un astrolabe de Danjon.

Danjon a éliminé l'équation personnelle de l'observateur grâce à un micromètre impersonnel, biréfringent, dont il est l'inventeur. On cherche à maintenir deux images en coïncidence en animant le biréfringent d'un mouvement de translation, ce qui permet de faire plusieurs pointés de la même étoile, grâce à une roue de contact qui lui est associée; celle-ci rend possibles les repérages d'instant de passages.

Le prototype 00 de l'astrolabe de Danjon a été construit à l'Observatoire de Paris; il est resté en service de 1952 à 1957 sur le site de Paris. L'astrolabe de



Danjon fonctionne à demi-pupille (pupille au sens d'objectif). Dans l'astrolabe actuel, mis en service en 1970, chaque faisceau utilise la pupille entière, d'où le nom donné par Billaud et Guinot de pleine pupille.

1.2.4 Échelles de temps

L'astrolabe permet d'atteindre les quantités UTO - UTC et UTO - TAI. En effet, depuis l'année 1976, de nouvelles échelles de temps ont été fixées de manière à satisfaire l'Astronomie, la Marine et tous les utilisateurs du temps civil. Il convenait, et cela a été l'œuvre de la Commission de l'heure de l'Union Astronomique Internationale, de faciliter la communication internationale et de normaliser les échelles de temps en vigueur.

Parmi celles-ci on citera:

- TAI (Temps Atomique International), qui est l'échelle de temps définie par le BIH sur la base des indications d'horloges atomiques des institutions coopérantes;

- UTO, temps solaire moyen compté depuis minuit; celui-ci prend en compte la longitude du lieu d'observation et le mouvement du pôle;

- UTC, (Temps Universel Coordonné): institué principalement pour la navigation, UTC est diffusé notamment par les signaux horaires. Il est aussi le temps de tous les jours, car il sert de base au temps légal de chaque pays. Enfin, il sert en astronomie pour certains calculs intermédiaires.

1.2.5 Groupes d'étoiles

De tels programmes d'observations fondamentales doivent porter aussi longtemps que possible sur des listes d'étoiles inchangées; à cet effet, on a

constitué, à Paris, douze groupes d'étoiles de telle façon que, en toute saison, plusieurs d'entre eux soient observables. Les étoiles qui les composent proviennent généralement du catalogue FK4. Le nombre d'étoiles de chaque groupe devrait être de 28 ou de 32 afin d'observer le même nombre d'étoiles (7 ou 8) dans chaque "quadrant", ou quart, de la sphère céleste locale. En fait, on a été conduit à constituer 9 groupes de 28 étoiles, un de 27, un de 29 et un de 30 étoiles.

L'observateur suit un programme préétabli qui le fait observer tantôt dans un quadrant, tantôt dans un autre. Il suit ce plan dans la mesure où l'humidité, le brouillard, les nuages le lui permettent. Il s'agit de décorrélérer les phénomènes qui auraient pu être corrélés accidentellement. C'est l'une des préoccupations majeures. En général, si le nombre d'étoiles observées est inférieur à 11, on ne tient pas compte de l'observation de ce groupe. Le programme établi pour chaque nuit permet, théoriquement, d'effectuer les observations de façon aléatoire.

1.3 Description des données

1.3.1 Échantillon choisi

Il est constitué par les 536 résultats provenant de 536 observations de groupes d'étoiles, pendant un période de trois ans, du 1-er juillet 1979 au 30 juin 1982. À chaque observation de groupe d'étoiles correspondent des renseignements d'ordre qualitatif et quantitatif qui seront désignés dans la suite par le mot de "variable". Ces variables sont:

- la date: année, mois, jour;
- le numéro du groupe d'étoiles observé: 1; 2; ...; 12;
- le numéro de l'observateur;
- le nombre d'étoiles du groupe qui ont pu être observées;
- la moyenne (UTM) des instants d'observation des étoiles d'un même groupe au cours d'une même nuit, exprimée en heures et fraction décimale d'heure;
- $\Delta\varphi$: latitude du groupe à UTM - latitude moyenne de Paris-Astrolabe, en secondes de degré;
- UTO - TAI, en secondes d'heure;
- le rayon ($-\Delta z$), défini comme ci-dessus (§3.1), en secondes d'angle;
- le poids en temps; - le poids en latitude;
- le poids du groupe, poids qui est appliqué au rayon.

1.3.2 Notion de poids en astronomie

Les données comportent trois sortes de poids qui sont calculés à partir du système d'équations résolu par la méthode des moindres carrés. Pour une série de mesures d'écart-type σ , les poids sont inversement proportionnels aux variances. Une bonne mesure est caractérisée par un poids élevé.

	GR1	GR2	GR3	GR4	GR5	GR6	GR7	GR8	GR9	GR10	GR11	GR12
Janvier		2	6	10	5	3	2	1				
Février			1	17	13	10	5					
Mars				4	15	14	9	5	1			
Avril						14	16	12	5	1		
Mai							3	12	7	3		
Juin								6	13	10	4	
Juillet	4								4	27	19	12
Août	14	9								14	17	15
Septembre	24	16	1								20	25
Octobre	9	6	3	1							1	4
Novembre	14	13	7	4	3							2
Decembre	2	5	6	3	3							

1.3.3 Groupes et mois de l'année

Le tableau ci-dessus résulte du croisement des groupes avec les mois: il donne le nombre de groupes observés dans chaque cas, au cours de la période considérée: apparaît un effet saisonnier (présence dans le ciel nocturne).

1.3.4 Adjonction de variables

Aux variables énumérées précédemment, on a ajouté:

- les semestres de la période d'observation;
- le jour de la semaine, trouvé dans les éphémérides;
- une variable "nombre de groupes" indiquant si le groupe est le seul observé au cours de la même nuit, ou s'il y en a deux, trois ou quatre;
- une variable "rang".

Au cours d'une nuit, les groupes sont repérés par leur heure moyenne d'observation (UTM). On peut les classer les uns par rapport aux autres en utilisant ce critère. Par exemple, RG21 désignera le premier groupe d'une suite de deux, et RG44, le quatrième d'une suite de quatre groupes.

Pendant les trois années qui font l'objet de cette étude, étaient prévus des programmes d'observations de trois ou de quatre groupes. Les quelques suites de cinq groupes, observées à titre exceptionnel, ont été assimilées à des suites de quatre groupes.

1.4 Codage des variables

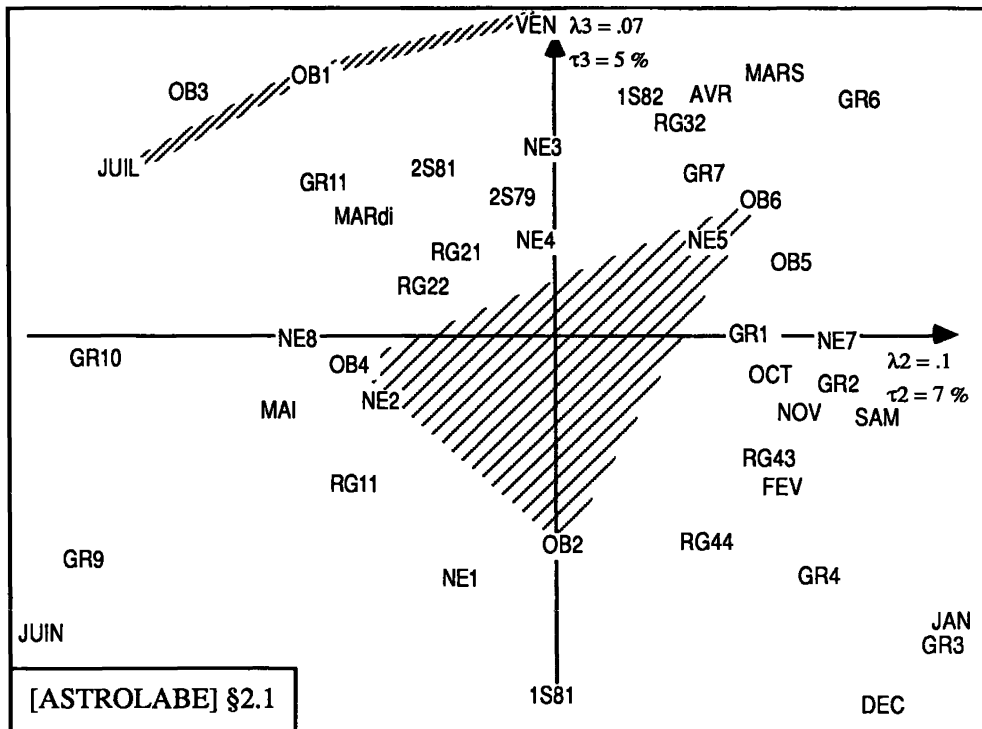
Les variables ont été réparties en classes d'égal effectif, dans la mesure du possible; ces classes étaient nécessaires à la formation du tableau de Burt d'où seront extraits les sous-tableaux analysés.

Pour chacune des variables, on a indiqué sur une échelle: les sigles retenus, l'effectif de chaque classe et l'ordre de grandeur des bornes dans le cas des variables continues. La première série d'échelles concerne les variables discontinues, la seconde les variables continues.

Semestre	2S79 1S80 2S80 1S81 2S81 1S82		123 68 131 55 56 103	
Mois	JANV FEVR MARS AVRI MAI JUIN JUIL AOÛT SEPT OCTO NOVE DECE		29 46 48 48 25 33 66 69 86 24 43 19	
Groupe d'étoiles	GR1 GR2 GR3 GR4 GR5 GR6 GR7 GR8 GR9 GR10 GR11 GR12		67 51 24 39 39 41 35 36 30 55 61 58	
Nombre d'étoiles	NE1 NE2 NE3 NE4 NE5 NE6 NE7 NE8		10 à 18 19 à 21 22, 23 24 25 26 27 >27	
	49 64 75 64 77 81 68 58			
Jour	LUN MAR MER JEU VEN SAM DIM		105 92 85 100 40 42 72	
Observateur	OB1 OB2 OB3 OB4 OB5 OB6		38 139 9 134 12 204	
n de grps par nuit	NG1 NG2 NG3 NG4		63 118 150 205	
variable "rang"	RG11 RG21 RG22 RG31 RG32 RG33 RG41 RG42 RG43 RG44		63 59 59 50 50 50 50 50 50 55	
UTM	UTM1 UTM2 UTM3 UTM4 UTM5 UTM6 UTM7		17.5 20.5 21.4 22.2 23.0 24.0 25.6 29.3	
	73 73 76 76 75 81 82			
TAI-UTO	OI7 OI6 OI5 OI4 OI3 OI2 OI1		20.4 20.1 19.7 19.1 18.9 18.5 18.1 17.9	
	77 76 77 76 77 76 77			
Poids en temps	T1/7 T2/7 T3/7 T4/7 T5/7 T6/7 T7/7		0.4 1.0 1.4 1.8 2.3 2.8 3.6 10.2	
	72 79 77 79 72 77 80			
Latitude Δphi	PHI1 PHI2 PHI3 PHI4 PHI5 PHI6 PHI7		0.30 0.57 0.64 0.69 0.73 0.77 0.84 1.29	
	78 78 75 78 76 76 75			
Poids en latitude	I1/7 I2/7 I3/7 I4/7 I5/7 I6/7 I7/7		0.2 0.8 1.1 1.3 1.6 2.0 2.6 8.2	
	78 78 75 78 76 76 75			
Rayon -Δz	RY1 RY2 RY3 RY4 RY5 RY6 RY7		0.05 0.7 0.8 1.0 1.4 2.7 3.0 3.3 3.7	
	81 81 80 80 73 71 70			
Poids du groupe	P1/7 P2/7 P3/7 P4/7 P5/7 P6/7 P7/7		0.4 1.1 1.4 1.7 2.1 2.6 3.3 10.7	

2 Analyses préliminaires. Qualité des mesures et observateurs

Les données brutes comportent des poids qui indiquent la qualité des mesures. Les observations qui, fondamentalement, sont constituées par des



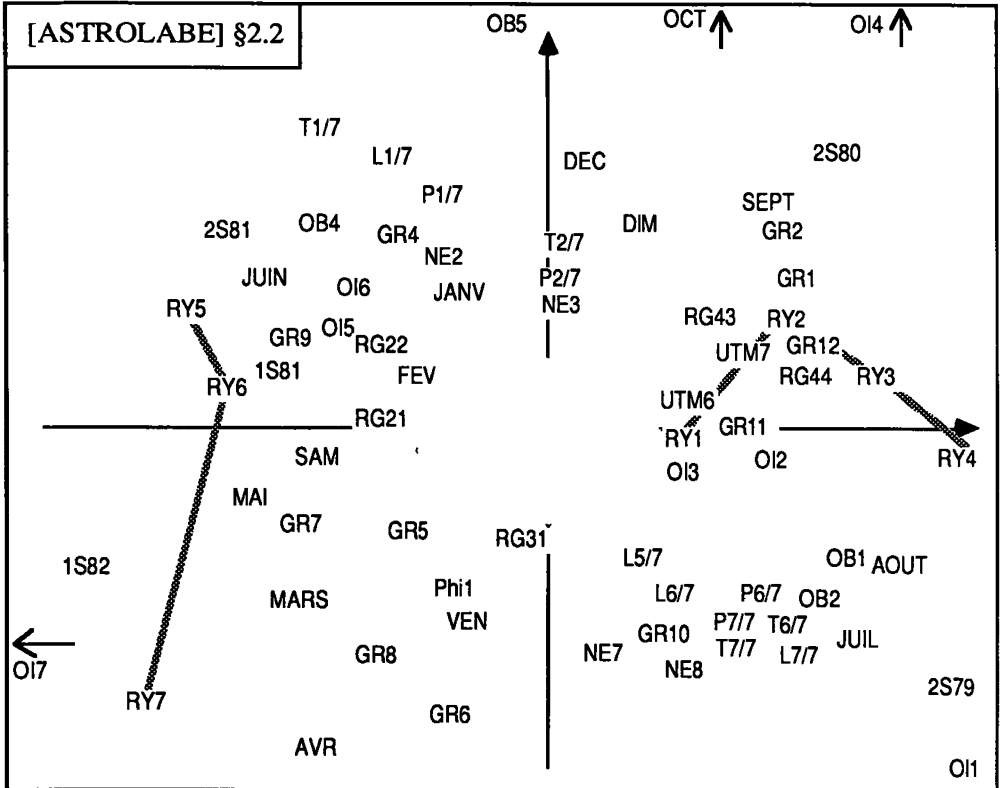
déterminations de temps de passage, conduisent à des mesures relatives à plusieurs variables affectées d'un poids qui caractérise les cohérences internes. Les données brutes codées ont fait l'objet d'analyses exploratoires. À celles des tableaux de Burt des variables continues et discontinues - et on retiendra cette dernière - on a ajouté celle du sous-tableau de Burt:

variables discontinues × variables continues.

2.1 Analyse du tableau de Burt des variables discontinues

I: {semestres; mois; jours; groupes; NE; observateurs; rang}.

Le plan (2,3) est celui des observateurs. Les observateurs 2, 4 et 6 sont bien corrélés avec ce plan. L'axe 2 oppose l'observateur 4 à l'observateur 6; l'axe 3 oppose l'obs. 2 à l'obs. 6; ce qui place ces trois observateurs aux sommets d'un triangle aisément repérable. En dehors de ce triangle, on trouve l'observateur 1, à même distance du mois de juillet et du vendredi. L'observateur 3 est proche de l'obs. 1; l'obs. 5, proche de l'obs.6. Ces deux observateurs 3 et 5 ont très peu observé, c'est pourquoi ils seront mis en éléments supplémentaires dans les analyses ultérieures. On notera que les obs. 2, 4 et 6 sont ceux qui ont le plus observé au cours de la période étudiée.

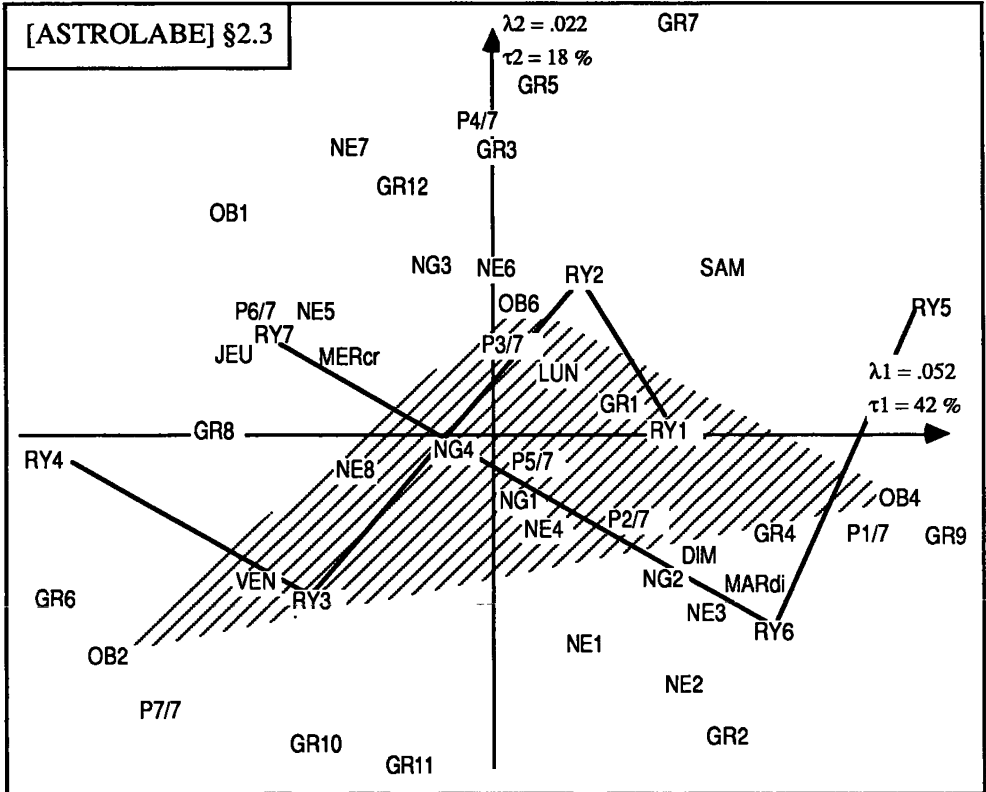


2.2 Analyse: variables discontinues × variables continues

I: {semestres; mois; jours; groupes; NE (nombre d'étoiles observées dans le groupe); observateurs, rangs};

J: {UTM; UTO; UTO-TAI; variation de latitude (PHI); rayon (RY); poids en temps; poids en latitude; poids du groupe}.

Dans le plan (1,2), on observe une rupture spectaculaire dans la ligne qui joint, en ordre, les modalités du rayon. Ce qui frappe également, c'est la proximité des modalités de même rang des divers poids avec certaines variables, telles les observateurs, le nombre d'étoiles observées dans un groupe, la période de l'année. Que les modalités de même rang des divers poids soient proches les unes des autres, cela ne peut étonner. Ce phénomène découle du principe d'équivalence distributionnelle, base de l'analyse des correspondances. Les modalités de rangs 6 et 7 des poids sont proches des observateurs 1 et 2, ainsi que des nombres élevés d'étoiles observées (NE7 et NE8), du mois de juillet et

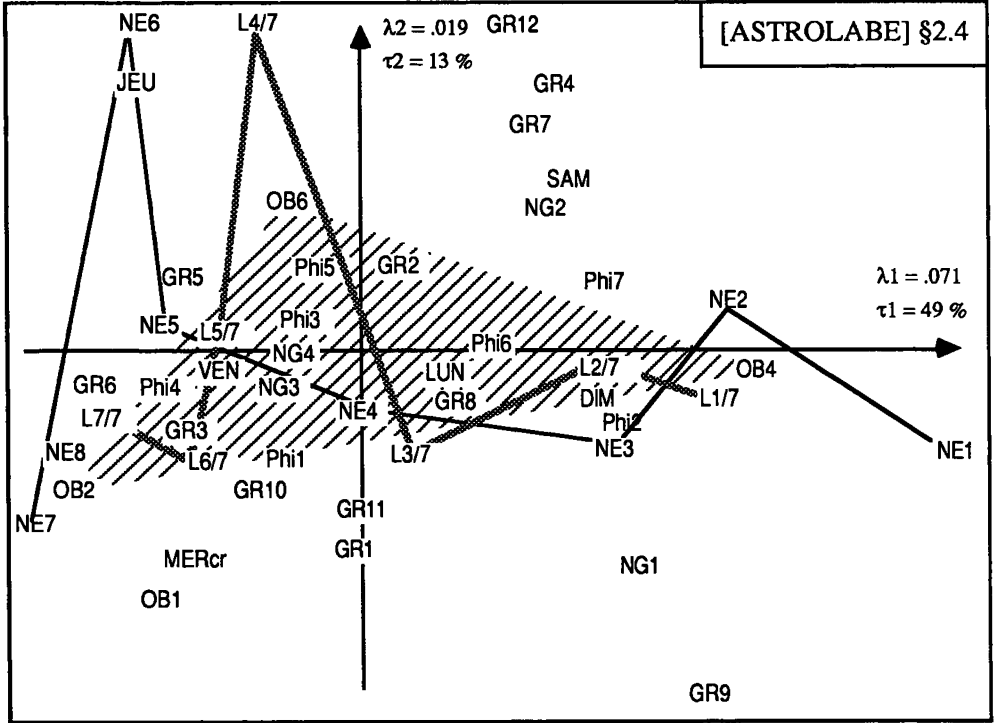


du mois d'août. Les modalités de poids de rang 1 et 2 sont proches de l'observateur 4, de NE1 et NE2, nombre d'étoiles peu élevé, du mois de janvier et du mois de juin. L'observateur 6 occupe une position centrale, donc les proximités ne sont pas interprétables. La concordance entre les poids et le nombre d'étoiles observées dans un groupe est classique pour les astronomes. Plus le nombre d'étoiles est grand, meilleure est la qualité des résultats.

2.3 Rayon, observateurs, poids du groupe

Lors du dépouillement des données brutes on avait noté une discontinuité dans les mesures du rayon entre le 15/1/81 et le 28/1/81. Or le cahier d'entretien de l'astrolabe signale que l'instrument a été révisé le 26/1/81. On a retiré la lame qui protège le bain de mercure. En principe, les mesures sont plus stables après révision. Afin de rechercher l'effet de cette intervention, on a analysé le tableau:

I : {jours; groupes, NE; NG; observateurs; rayon}
 J : {poids du groupe (applicable au rayon)}.



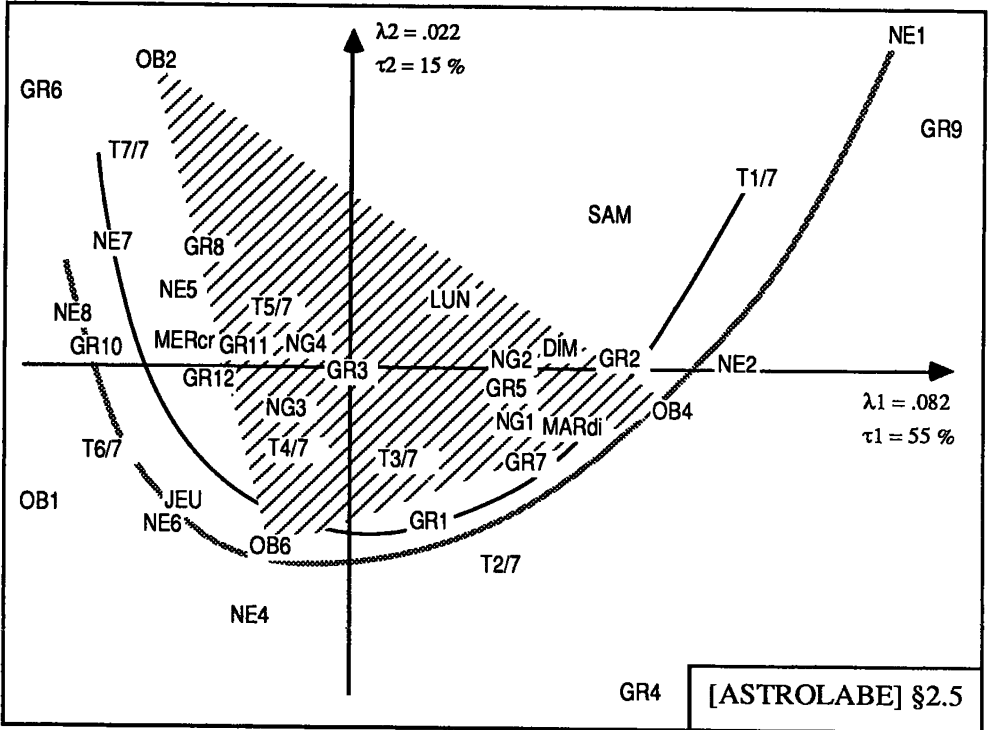
En effet, le poids théoriquement applicable au rayon n'a pas été calculé et l'usage est d'appliquer au rayon le poids du groupe.

Dans le plan (1,2), on observe la rupture entre les lignes qui joignent les modalités successives du rayon. Bien que ce ne soit pas l'objet principal de cette analyse, celle-ci donne des indications au sujet des trois observateurs principaux: 2, 4 et 6. Ceux-ci sont les sommets d'un triangle qui se détache bien dans le plan. L'observateur 2 est très voisin de P7/7, très bon poids, l'observateur 4 de P1/7, poids médiocre, tandis que l'obs. 6 est voisin de P3/7 et de P4/7 qui sont des poids que l'on qualifie de bons.

2.4 Latitude, observateurs, poids

Les mesures effectuées à l'aide de l'astrolabe ont pour but, entre autres, de déterminer la latitude instantanée du lieu d'observation et, ainsi, d'accéder aux variations aléatoires du pôle terrestre. Afin d'étudier le lien éventuel entre les variations de latitude et les poids en latitude, on a procédé à l'analyse du tableau:

- I : {jours; groupes; NE; NG; observateurs; variations de latitude (PHI)};
- J : {poids en latitude}.



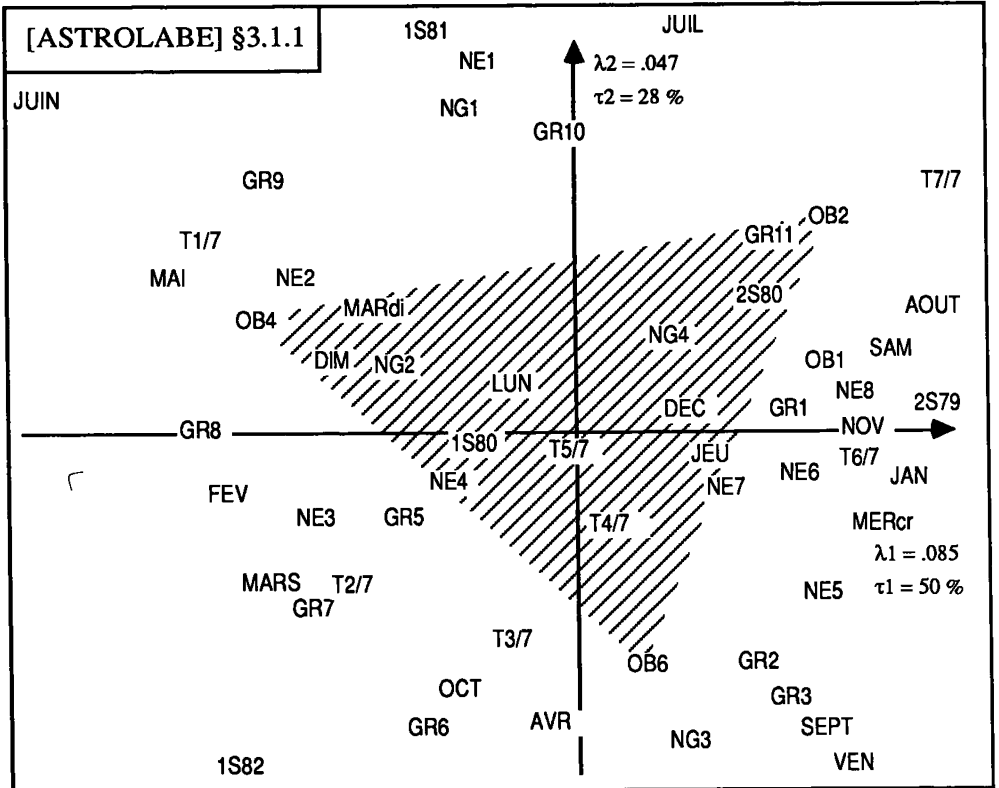
On observe, dans le plan (1,2), une concordance entre le nombre d'étoiles observées dans un groupe et les poids en latitude. Les observateurs 2, 4, 6 sont les sommets d'un triangle très visible dans le plan. Les observateurs 1 et 2 sont voisins des poids L6/7 et L7/7; l'obs.4 est voisin de L1/7; l'obs.6 est proche de L4/7, de L5/7 ainsi que de L3/7.

2.5 Observateurs et poids en temps

On a conservé les variables discontinues susceptibles d'expliquer les différentes modalités du poids en temps. Les ensembles en correspondance sont:

- I: {jours; groupes; NE; NG; observateurs};
- J: {poids en temps}.

Dans le plan (1,2), les lignes joignant respectivement les modalités des deux variables *poids en temps* et *nombre d'étoiles observées dans un groupe* suggèrent deux paraboles dues à un effet Guttman. Les observateurs sont toujours disposés suivant une configuration triangulaire très nette. L'observateur 2 est proche de T7/7; l'obs. 4 est voisin de T1/7 et de T2/7; l'obs.6, de T3/7 et de T4/7. L'observateur 1 est voisin de T6/7.



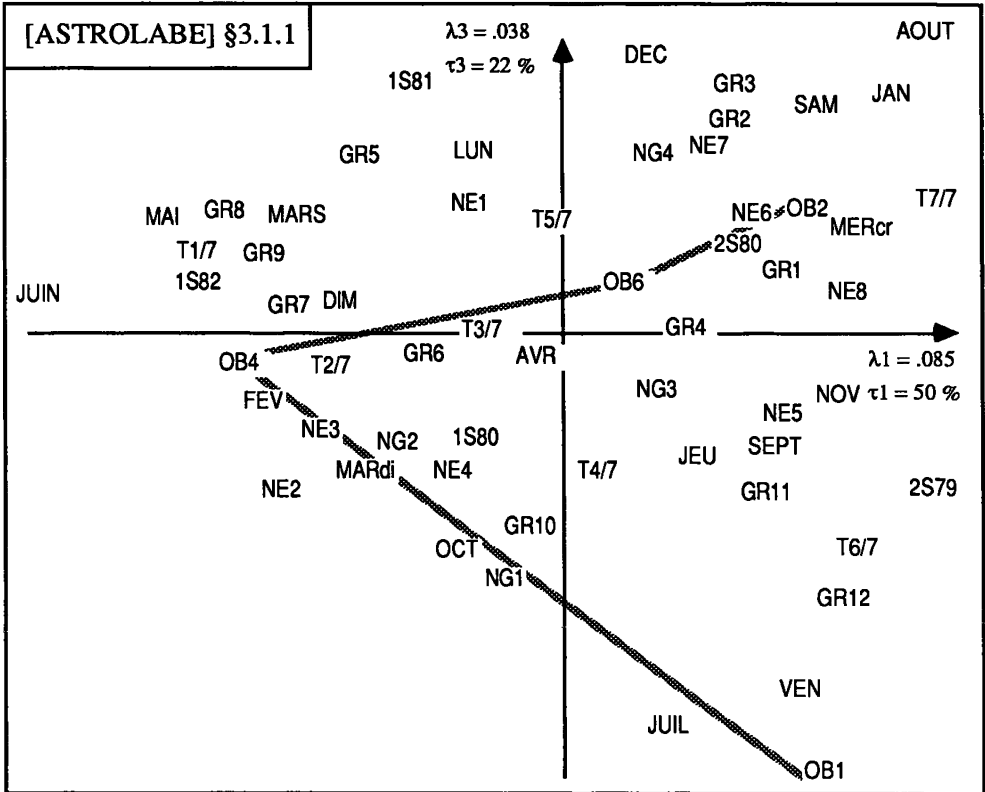
3 Orientation des analyses ultérieures

La plupart des analyses précédentes mettent en évidence un “triangle des observateurs” et des proximités stables. Or, les poids tombant dans les modalités 1 et 2 sont médiocres; dans les modalités 3, 4, 5, bons; dans les modalités 6 et 7, très bons. Un rapprochement entre les observateurs et la qualité des mesures s'est imposé peu à peu. Il était certainement prématuré de conclure. C'est pourquoi on a procédé à des analyses orientées délibérément vers ce qui peut caractériser les observateurs 2, 4 et 6, et, dans une certaine mesure, l'observateur 1, pour la période considérée (1979-1982).

3.1 Caractéristiques des observateurs

3.1.1 Analyse du sous-tableau: observateurs × caractéristiques

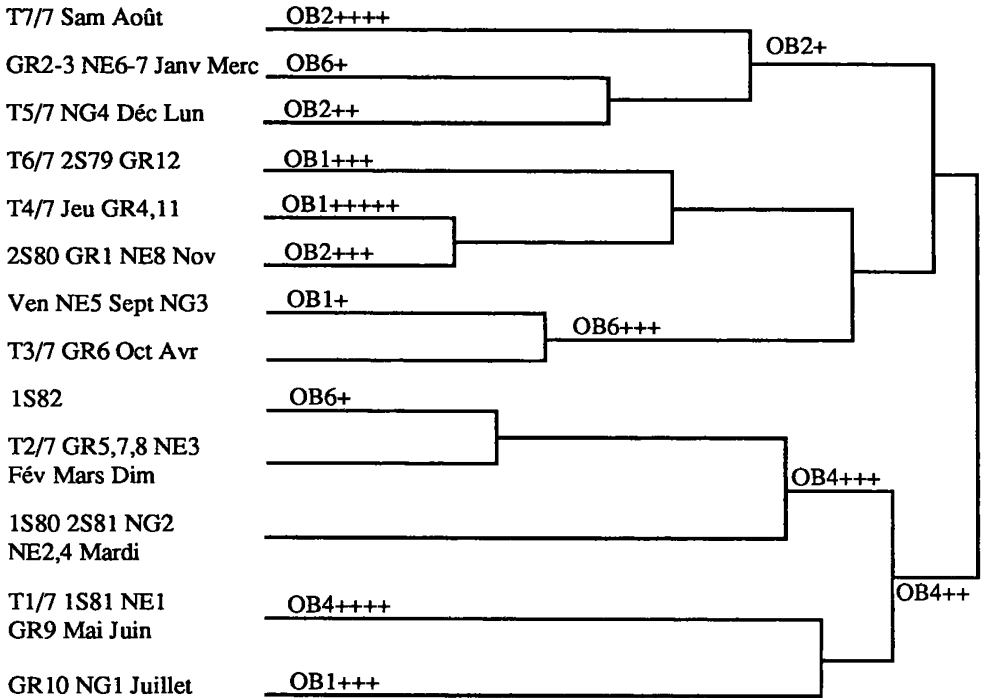
Les observateurs sont ceux qui sont référencés 1; 2; 4; 6. Afin de découvrir les caractères prédominants de chacun d'eux, on a analysé le tableau:



I: {semestres; mois; jours; groupes; NE; NG; poids en temps};
 J: {observateurs 1, 2, 4, 6}.

Non seulement le plan (1,2) montre le “triangle des observateurs” ainsi que les proximités déjà rencontrées avec les différentes modalités du poids en temps, mais encore d’autres proximités retiennent l’attention. L’observateur 2 et l’observateur 1 sont voisins de NG4, c’est-à-dire des observations de quatre groupes au cours de la même nuit; l’obs. 4 est voisin de NG2 (deux groupes observés); l’observateur 6, lui, est voisin de NG3 (trois groupes observés).

L’examen du plan (1,3) permet de compléter les résultats précédents. L’observateur 1 est voisin du 2-ème semestre 1979, du vendredi et de T6/7, poids très bon. L’observateur 2 est voisin du 2-ème semestre 1980, du mercredi et de T7/7, poids très bon. L’observateur 4 des premiers semestres 1980 et 1982, du dimanche et du mardi, de T1/7 et de T2/7, poids médiocres. L’observateur 6 est proche du 1er semestre 1982 et de T3/7, poids estimé bon.



3.1.2 Classification ascendante hiérarchique sur l'ensemble I

Cette classification a été effectuée sur les variables:

{semestres; mois; jours; groupes; NE; NG; poids en temps};

à l'aide de ces variables, on peut cerner le comportement des observateurs .

L'observateur 1 observe principalement en juillet et en septembre, le jeudi et le vendredi. Il a spécialement observé au cours du 2-ème semestre de l'année 1979. Ses mesures sont très bonnes.

L'observateur 2 observe surtout en janvier, en juillet et en août; au mois d'août, il observe plus que tous les autres. Ses jours d'observation sont plutôt le lundi, le mercredi et le samedi. Il observe aussi bien des séquences de quatre groupes qu'un groupe unique. Le nombre d'étoiles observées par groupe est très élevé. Ses mesures sont très bonnes.

L'observateur 4 observe en février et en mars, et plus que chacun des autres en mai et en juin. Il observe surtout le mardi et le dimanche. Il a observé spécialement au cours du 1er semestre de l'année 1980 et pendant l'année 1981.

Le nombre d'étoiles observées par groupe est faible et, plus que tous les autres, il observe le groupe 9. Il observe des suites de deux groupes ou uniquement un groupe. Ses mesures sont caractérisées par des poids médiocres.

L'observateur 6 observe toute l'année, mais particulièrement pendant le 2-ème semestre 1980. C'est lui qui observe le plus de séquences de trois groupes. Le nombre d'étoiles observées par groupe est variable; les poids sont bons.

3.2 Introduction de la variable "nuit d'observation"

Pendant les trois années sur lesquelles a porté cette étude, il y a eu 536 observations de groupes. Ce sont elles qui ont fait l'objet de toutes les analyses précédentes. Mais nous avons pensé à examiner aussi leur répartition en nuits.

Au cours d'une nuit, l'observateur doit, suivant un programme préétabli, observer trois ou quatre groupes, à moins que les conditions atmosphériques ne viennent entraver ses projets. Des règles précises indiquent à l'observateur s'il doit attendre un ciel plus propice. Chacune des nuits, lorsqu'il y a eu observation, correspond à un, deux, trois ou quatre groupes.

Par le moyen de la notion de nuit, on a essayé de mieux connaître les particularités des observateurs. À cet effet, on a formé deux tableaux croisés:

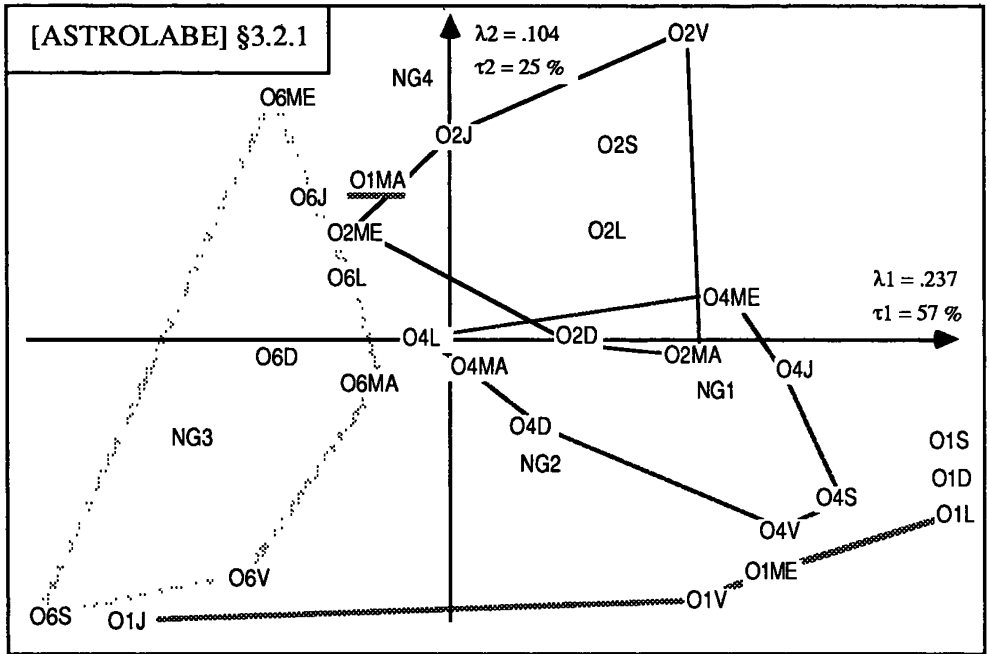
NG	1	2	3	4	
Lundi	11	11	9	11	42
Mardi	12	13	7	8	40
Mercredi	7	4	9	10	30
Jeudi	10	9	9	11	39
Vendredi	7	7	5	1	20
Samedi	5	4	6	3	18
Dimanche	11	10	6	5	32
total	63	58	51	49	221

OB	OB1	OB2	OB4	OB6	
Lundi	1	13	13	15	42
Mardi	3	10	15	10	40
Mercredi	2	9	4	13	30
Jeudi	4	10	11	14	39
Vendredi	5	2	3	9	20
Samedi	1	5	4	6	18
Dimanche	3	5	13	9	32
total	19	54	63	76	221

- nuit × nombre de groupes observés pendant la nuit (NG; à gauche);
- nuit × observateurs (OB; à droite).

On dénombre ainsi une quarantaine de nuits d'observation le lundi, le mardi et le jeudi; viennent ensuite le mercredi et le dimanche; enfin le week end pendant lequel un service spécial a été mis en place. En effet, on observe peu le vendredi et le samedi soir, les observations y étant effectuées surtout par l'observateur 6 et l'observateur 1.

L'obs. 2 observe volontiers au début de la semaine. L'obs. 4 observe beaucoup plus que les autres le mardi et le dimanche. L'obs. 6 observe plus que les autres tous les jours de la semaine à l'exception du mardi et du dimanche. C'est lui qui a le plus observé au cours de ces trois années, non seulement en ce qui concerne les groupes, mais encore les nuits.



3.2.1 Observateurs, jours et nombre de groupes observés au cours de la nuit

Il convenait de faire la synthèse de l'information contenue dans ces deux tableaux. À cet effet, on a procédé à l'analyse du tableau ternaire $((I \times J) \times K)$ déterminé par:

I: {les observateurs 1, 2, 4, 6};

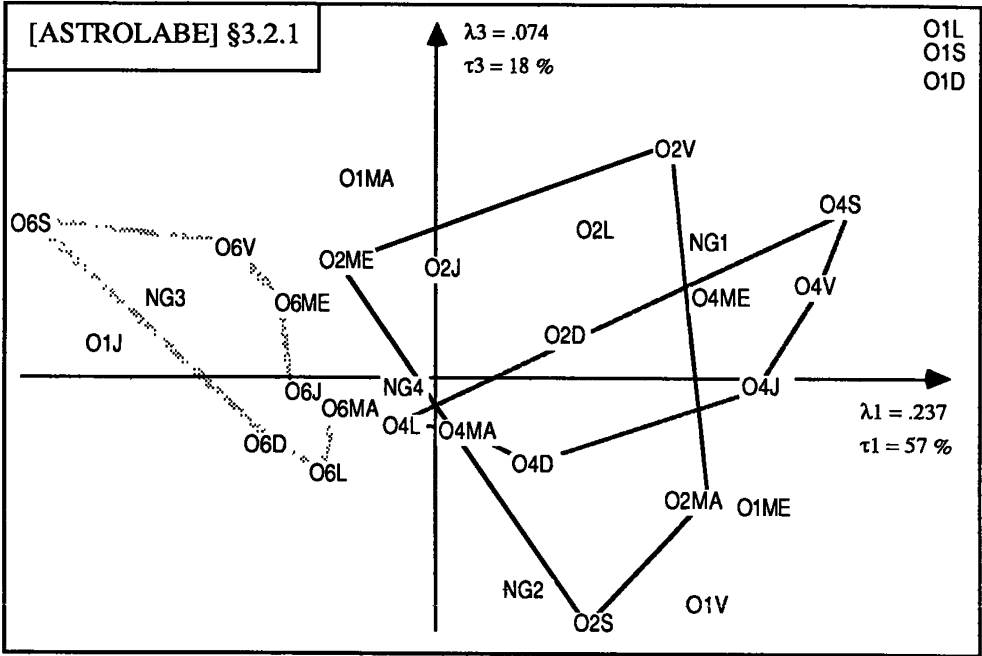
J: {les nuits des lundi, mardi, etc.};

K: {le nombre de groupes observés: NG1, NG2, NG3, NG4}.

Les sigles ont été modifiés. Dans ce qui suit, les observateurs deviennent: O1, O2, O4, O6. et les jours de la semaine sont désignés par une ou deux lettres. Ainsi, O4J représente les observations qui ont été faites par l'observateur 4 le jeudi.

Dans le plan (1,2), on distingue très bien les positions de chaque observateur, réunies par un réseau de lignes polygonales.

Celle qui joint les jours de l'observateur 6 contient NG3. L'observation des séquences de trois groupes caractérise, comme dans l'analyse précédente, l'observateur 6.



La ligne polygonale qui joint les jours de l'obs.4 empiète sur celle de l'obs.2. L'obs. 4 est proche de NG2, deux groupes observés, et il est caractérisé par NG1, un seul groupe observé, qui est au centre du polygone.

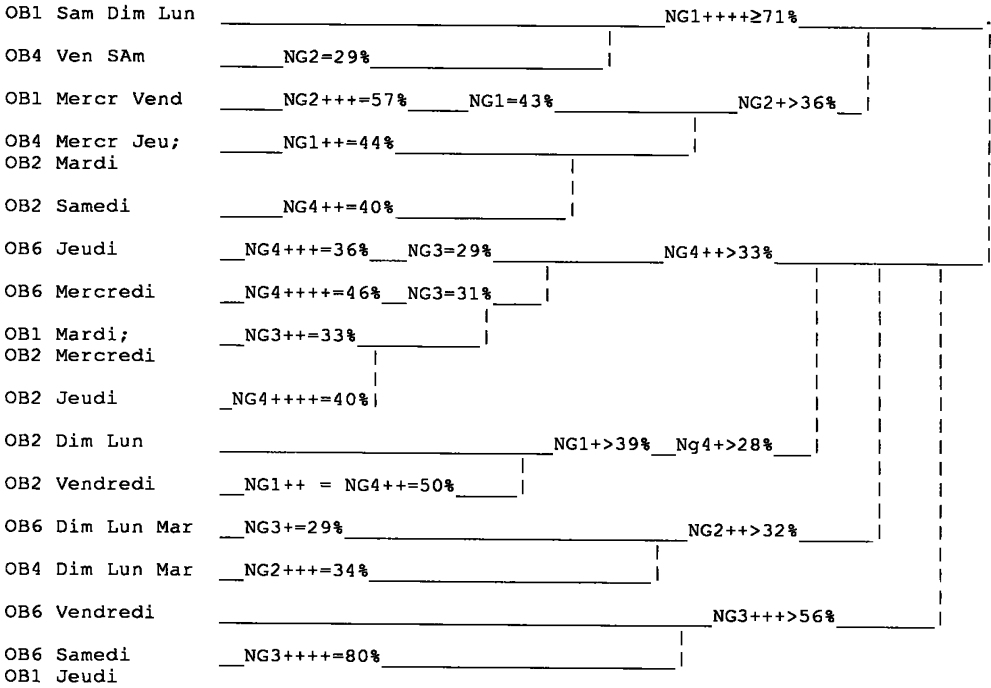
L'observateur 2, lui aussi, a un territoire bien délimité. La ligne polygonale qui joint ses jours ne contient aucun sigle NG. Mais, à proximité, on trouve NG1 qu'il partage avec l'observateur 4, et NG4, qu'il pourrait partager avec l'observateur 6.

Le plan (1,3), qui, comme le plan (1,2), permet de caractériser les observateurs par le nombre de groupes observés au cours d'une nuit, montre très clairement ces séparations avec un empiètement plus important de l'obs. 4 sur l'obs.2. Les observations du lundi et du mardi de l'obs.4 sont voisines de NG4, quatre groupes observés dans la nuit.

L'observateur 1 a beaucoup moins observé que les autres observateurs. Souvent proche de NG1, il se trouve voisin de NG4 le mardi, et sur le même polygone que l'observateur 6 le jeudi.

Toutes ces proximités demandaient à être confirmées par une classification ascendante hiérarchique complétée par une aide à l'interprétation.

profil moyen: NG1 = 28% ; NG2 = 26% ; NG3 = 23% ; NG4 = 23% .



3.2.2 Classification ascendante hiérarchique sur l'ensemble (observateurs × nuits)

Les suites de quatre groupes sont associées aux mardis de l'obs.1, aux mercredis et jeudis de l'obs. 6, à tous les jours de la semaine pour l'obs. 2 à l'exception du mardi. Les plus importantes de ces associations concernent les mercredis et jeudis de l'obs. 6 ainsi que les jeudis de l'obs. 2. Ces résultats confirment les proximités que le plan (1,2) avait mises en évidence.

Quel que soit le jour de la semaine, l'obs. 6 est associé aux suites de trois groupes. Ces suites sont également associées aux mardis et jeudis de l'obs. 1, ainsi qu'aux mercredis et jeudis de l'obs. 2.

Les suites de deux groupes sont associées, tous les jours de la semaine, à l'obs. 4. Elles le sont aussi à l'obs. 1, le mercredi et le vendredi. Les observations d'un seul groupe sont le fait de l'obs. 1 (samedi, dimanche, lundi, mercredi, vendredi), de l'obs. 2 (dimanche, lundi, mardi, vendredi) et de l'obs. 4 le mercredi et le jeudi. On peut noter que l'obs. 6 n'est pas associé aux observations d'un seul groupe.

3.3 Caractérisation de chaque observateur par les suites de groupes qu'il observe

On connaît les nuits d'observation au cours de la semaine, le nombre de groupes souvent observés pendant une nuit, la qualité de leurs observations également. Cependant, sur plusieurs graphiques, on avait pu noter la proximité de l'observateur 4, des poids médiocres et du groupe 9. Ce groupe serait-il à l'origine d'observations de moins bonne qualité? L'analyse des correspondances a permis d'apporter une réponse à la question suivante: y a-t-il des suites de groupes qui caractérisent chacun des observateurs?

3.3.1 Suites de groupes observées

Dans la présente analyse, on introduit de nouveau les 536 observations de groupes. Le tableau analysé $((I \times J) \times K)$ est défini par:

I: les 12 groupes d'étoiles;

J: la variable "rang": {RG11; RG21; RG22; RG31; ...; RG44};

K: les trois observateurs principaux: {OB2; OB4; OB6}.

En vue de la présente analyse, des sigles ont été créés pour désigner les éléments de $I \times J$. En première position, on trouve le numéro du groupe; les lettres A, B, C servant à désigner les groupes 10, 11, 12. Puis vient le sigle de la variable "rang", duquel on a éliminé la lettre 'G': ainsi, AR32 désigne le groupe 10, observé en second, dans une séquence de trois groupes.

Puisqu'on n'a retenu que 3 observateurs, chaque ligne du tableau analysé est un triplet; on lit par exemple:

	OB2	OB4	OB6
7R21	0	3	1

Le triplet (0, 3, 1) signifie que l'obs 2 n'a jamais observé une suite de deux groupes commençant par le groupe 7, l'obs.4 l'a fait trois fois et l'ob.6 une seule fois.

L'unique plan, puisque l'ensemble K ne comporte que trois éléments, a montré un nombre considérable de superpositions. Après la proximité des modalités de même rang des divers poids (§2.2), la superposition des points: la raison ne serait-elle pas la même?

En projection, des triplets tels que (0, 3, 1), (0, 6, 2) sont superposés. D'après le principe d'équivalence distributionnelle, des lignes proportionnelles se projettent en un même point, ce qui explique ces superpositions. Or le logiciel d'analyse des correspondances dû à Ch. Féghali donne, avec le graphique, la liste des points superposés. Cette liste, (seule publiée ici, à l'exclusion du graphique, en séparant par des ';' les groupes de points superposés), a permis de reconstituer les suites de groupes observées par chacun des observateurs. (Une CAH aurait également permis de déceler les profils identiques).

1R42, 2R31, 4R32, 2R43, CR32, 7R33, 5R33, 1R33, 5R31, 6R32, CR41, 4R33, 3R31, BR31, 3R44, 3R32; 6R31, 8R33, 7R32; 5R21, 6R22; 3R22, AR43, 8R32, 7R22, 2R21, 9R33, BR44, 9R42, 8R41, 7R31, 6R21; 5R42, 7R21, 6R43, 4R41, 7R44, 8R22; BR43, 1R22, CR21, AR42, 2R11, AR32, CR11, CR44, 9R41, 9R31, BR33, 8R11; 4R31, 6R33, 5R32; 2R22, 1R21; 5R44, 2R41, 3R42, 4R43; 8R21, 9R22; 4R21, 5R22; AR22, 9R21; AR11, 6R11; CR31, 2R33, 1R32; CR42, BR41, 1R43, 2R44; BR11, 3R33, CR22, 2R32, 1R31, BR21, 3R11; BR22, AR21; 9R32, 7R42, 8R31, 4R44, AR33, 8R43, 9R44, 6R41, 3R43, 2R42, 1R41; CR33, BR32, AR31; 9R43, 7R41, 7R43, 8R44, AR44, 5R41, 6R42; 3521, 4R22; CR43, 1R44, BR42, AR41;

3.3.2 Reconstitution des suites de groupes

On lit, au début de la ligne trois la superposition des éléments:

5R42; 7R21; 7R44; 6R43; 4R41; 8R22.

Cette superposition correspond à deux séquences caractérisées par le triplet (0, 3, 1): l'une est (4R41; 5R42; 6R43; 7R44). Le groupe 4 est le premier groupe d'une suite de quatre groupes, le groupe 5 est le second, le groupe 6 est le troisième et le groupe 7 le quatrième. Cette séquence n'a jamais été observée par l'observateur 2, elle l'a été trois fois par l'observateur 4 et une fois par l'observateur 6.

L'autre suite est: (7R21; 8R22). Le groupe 7 a été observé en premier, le groupe 8 en second, et il a fallu interrompre les observations. Cette suite a été observée par les observateurs avec la même fréquence que la précédente.

On lit également, sur la ligne 5, la superposition des éléments: 1R32; 2R33; CR31 ($C \approx 12$), caractérisés par le triplet (2, 0, 4). Ici, le groupe 12 a été observé en premier, le groupe 1 en second et le groupe 2 en troisième. L'observateur 2 a observé cette suite deux fois, l'observateur 6, quatre fois et l'observateur 4 ne l'a jamais observée.

On peut noter le cas très particulier du triplet (0, 6, 0) qui correspond à 8R11, donc au groupe 8 observé seul. L'observateur 4 est le seul à avoir effectué des observations de ce type et ceci, à six reprises. Ou encore (0, 0, 3), qui correspond à 5R31; 6R32; 7R33. Il s'agit d'une observation d'une suite de trois groupes dont le premier est le groupe 5, que l'observateur 6 est le seul à effectuer, et ceci, par trois fois.

On trouvera dans notre thèse la répartition des suites, à partir du premier groupe observé, pour chacun des observateurs. En revenant aux données brutes, on constate que les suites comportent toujours des groupes dont les numéros sont en ordre, sans omission. S'il manque un groupe, par rapport au programme, ce ne peut être que le premier qui était prévu ou le dernier (ou encore les derniers).

À titre d'exemple, nous donnons le détail des conclusions auxquelles nous sommes parvenu relativement à l'observateur 2, qui est celui qui obtient les meilleurs résultats.

3.3.3 Comportement de l'observateur 2 vis-à-vis des suites de groupes

L'observateur 2 observe plus que les autres les suites:

{GR10; GR11; GR12; GR1};{GR10; GR11; GR12};{GR5; GR6; GR7; GR8}.

La suite(GR11; GR12; GR1; GR2) a été observée cinq fois.

Seul, il observe la suite (GR1; GR2; GR3; GR4), et à deux reprises.

Il observe des suites de quatre groupes de préférence aux suites de trois groupes. Celles-ci sont rares. Les suites (GR1; GR2; GR3); (GR4; GR5); (GR6; GR8; GR9; GR10) ont été observées une seule fois. Rares sont les suites de deux groupes. À plusieurs reprises, il a observé un seul groupe: le groupe 1 (5 fois), le groupe 4 (4 fois), le groupe 9 (3 fois), le groupe 10 (2 fois).

Dans la période où les observations commencent par les groupes suivants: GR2, GR3, GR6, GR7, GR8, GR8, GR12, il y a peu d'observations, et quand il y en a, ce sont des observations d'un groupe unique ou de suites de quatre groupes. En revanche, la période où les groupes de début sont les groupes 1, 10, 11, et à un degré moindre, le groupe 4, est l'époque de nombreuses observations qui aboutissent à l'observation d'un nombre important de séquences de quatre groupes.

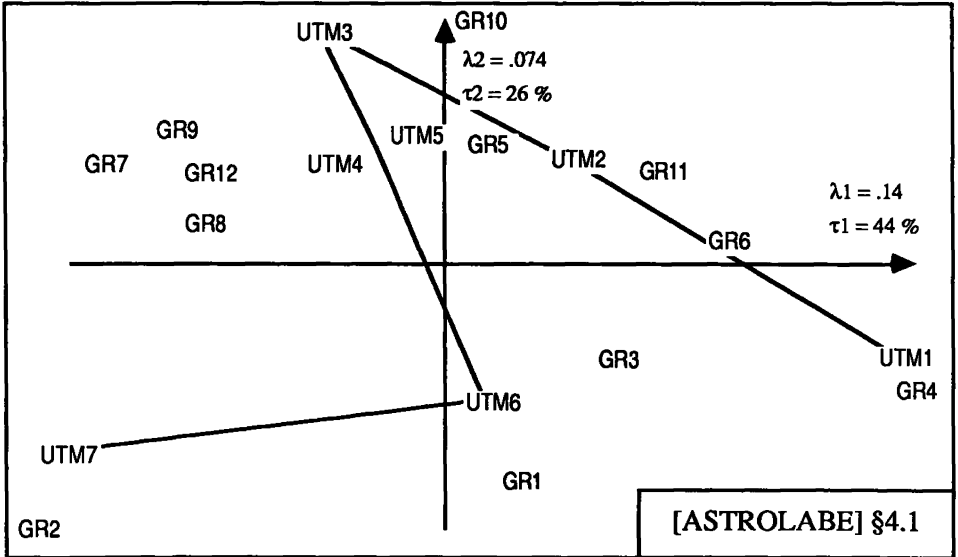
3.4 Conclusion: bilan de l'étude du comportement

Au fil des analyses, le comportement des trois observateurs principaux s'est dessiné peu à peu.

Les très bonnes mesures de l'obs. 2 sont obtenues grâce à de nombreuses suites de quatre groupes, accompagnées d'observations d'un unique groupe. On peut penser qu'il aime les observations très bien faites et que, si le premier groupe ne lui a pas donné toute satisfaction, il s'arrête. On peut aussi penser que son expérience lui permet de présager, dès la première observation, de la qualité de celles qu'il pourrait faire ultérieurement. Les premiers groupes observés sont les groupes 1, 10, 11 et, à un degré moindre, le groupe 4.

L'observateur 4 effectue des mesures dont le poids est souvent inférieur à celui des autres observateurs, mais ses observations comportent de nombreuses suites commençant par le groupe 9. On peut se demander la raison de cette originalité. Ce groupe, évité radicalement par l'observateur 6, ne serait-il pas une cause de la médiocre qualité de ces mesures?

Les observations de l'obs. 6 sont des suites de trois ou de quatre groupes. Or, les séquences de trois groupes, si elles ne sont pas programmées, ne peuvent provenir que d'une suite de quatre groupes dont le premier n'a pu être observé ou dont le dernier ne l'a pas été. On peut penser que l'obs.6 continue les observations, même si les premières ne sont pas excellentes, et qu'il effectue les dernières, même si les conditions atmosphériques ne sont pas très bonnes.



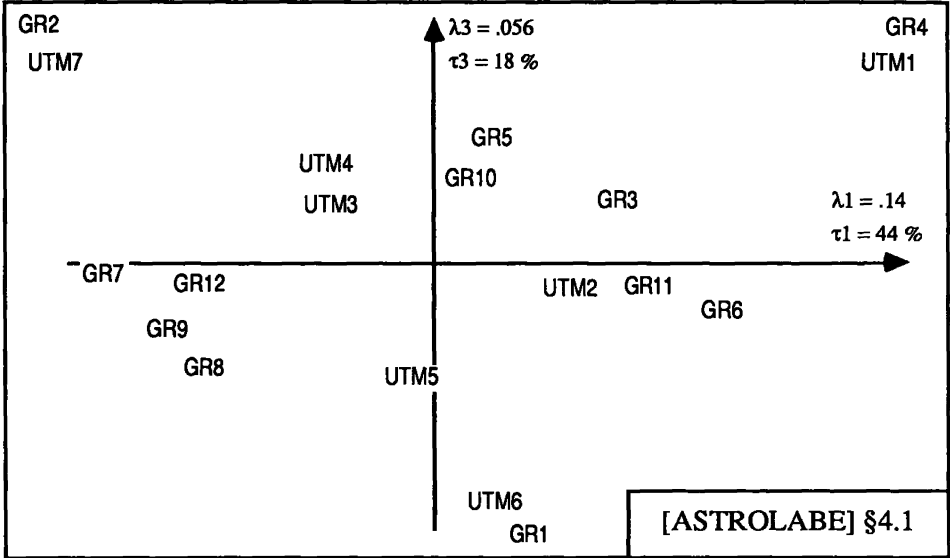
4 Du crépuscule à l'aube

À l'étude de comportement, on a ajouté une étude plus spécifiquement astrométrique qui fait intervenir l'heure d'observation des groupes. Les deux analyses qui suivent ont pour but d'étudier la qualité des résultats fournis au cours des différentes nuits d'observation: nuits courtes de l'été, longues de l'hiver, claires à certaines périodes, nuageuses à d'autres. Ainsi, nous nous sommes interrogé: une nuit d'observation comportant quatre groupes est-elle préférable à une nuit qui n'en comporte que trois? Est-il indifférent d'observer en début de soirée ou tard dans la nuit?

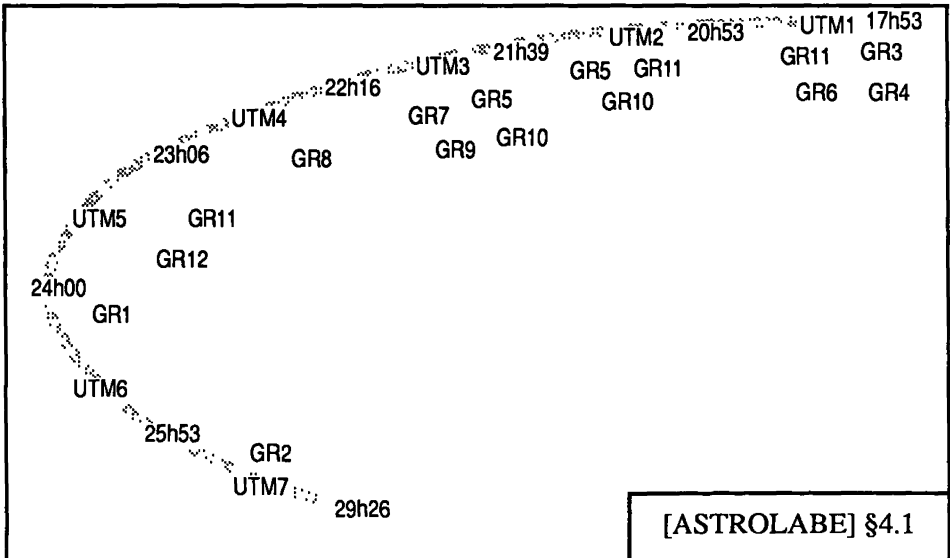
4.1 Analyse du sous-tableau de Burt: groupe × heure moyenne d'observation du groupe: description des plans (1,2) et (1,3)

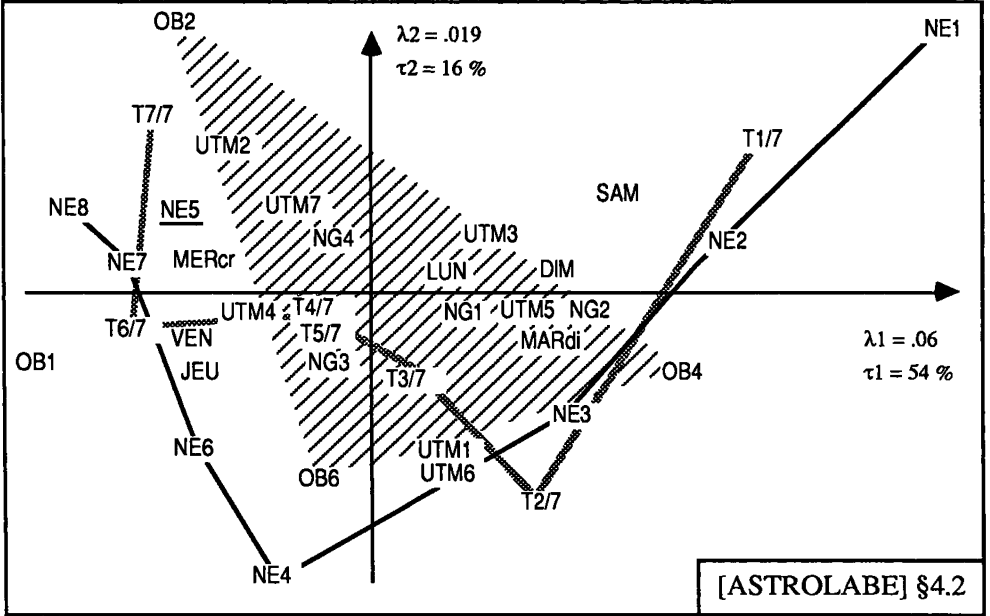
L'axe 1 oppose le groupe 2 et UTM7, observations faites tard dans la nuit, au groupe 4 et à UTM1, observations effectuées tôt dans la soirée. L'axe 2 montre une nouvelle opposition du groupe 2 et de UTM7; ici, ils sont tous deux opposés au groupe 10 et à UTM3. Cette configuration est très apparente dans le plan (1,2). Dans ce plan, on peut suivre la progression UTM1, UTM2, ..., UTM7, et les groupes qui sont voisins. Elle suggère de rapprocher les groupes 7, 8, 9 et 12 de UTM4, le groupe 5 de UTM2 et de UTM5.

Dans le plan (1,3), les groupes 7, 8, 9, 12 sont plus proches de UTM3 que de UTM4. Certaines proximités sont stables, telles celle du groupe 4 et de UTM1, celle du groupe 10 et de UTM3, celle du groupe 1 et de UTM6 ainsi que celle du groupe 2 et de UTM7.



Il apparaît déjà qu'avant 21h on observe particulièrement le groupe 4, vers 22h, le groupe 10, puis, après 24h, les groupes 1 et 2. La classification confirme ces résultats et suggère d'autres associations. Un schéma montre les groupes qui sont observés - ou observables - du crépuscule jusqu'à l'aube.





4.2 Analyse du sous-tableau de Burt: {UTM; jours; NE; NG; observateurs} × { poids en temps}

Les variables entrant dans cette étude sont le nombre d'étoiles observées dans un groupe (NE), le nombre de groupes observés au cours de la même nuit (NG), les observateurs (OB), les jours de la semaine (Lun...), l'heure moyenne d'observation d'un groupe (UTM), c'est-à-dire la moyenne des instants d'observation des étoiles d'un même groupe au cours d'une même nuit, et le poids en temps $T_m/7$, m désignant la modalité: les poids en temps sont des indicateurs de qualité des observations: les poids T1/7 et T2/7 sont des poids médiocres, T3/7, T4/7, T5/7 sont des poids que l'on peut qualifier de bons, T6/7 et T7/7 sont très bons.

On se propose de découvrir ce qui contribue à la qualité des observations. Les liens entre les groupes (GR) et les heures d'observation ont été établis au cours de l'analyse précédente, c'est pourquoi les groupes ne figurent pas parmi les variables; ils sont présents par l'intermédiaire de leur heure moyenne d'observation (UTM).

Dans le présent article on se bornera à présenter le plan (1,2). L'axe 1 montre une opposition entre T1/7 et T7/7, donc entre poids médiocres et poids très bons. Il oppose aussi l'observateur 4 aux observateurs 1 et 2. L'axe 2

oppose l'observateur 2 à l'observateur 6. On retrouve dans le plan (1,2) la configuration du "triangle des observateurs", déjà vue au §2.

Toutes les variables sont bien corrélées avec le plan (1,2). La ligne polygonale qui joint les modalités du nombre d'étoiles observées a, ici aussi, une allure très semblable à celle qui joint les poids en temps.

Les samedis, dimanches, lundis, mardis sont groupés dans la concavité des lignes polygonales. Ils sont proches de NG1 et de NG2, c'est-à-dire des nuits où un ou deux groupes seulement ont pu être observés, de UTM3 et de UTM5, périodes d'observation situées toutes deux avant 24h.

Le mercredi est voisin de T7/7 ainsi que d'un nombre d'étoiles observées élevé: NE7 et NE8. Le jeudi et le vendredi sont voisins de NE6, NE7 et de T6/7. Ainsi, il y a certainement des jours où les conditions sont rassemblées pour que les observations soient de très bonne qualité.

Dans ce même plan, l'observateur 1 est proche de T6/7 et l'observateur 2 est voisin de T7/7, mesures de très bonne qualité; l'observateur 4 est proche à la fois des poids médiocres T1/7 et T2/7, mais aussi de NE2 et NE3; le nombre d'étoiles observées est faible, entre 19 et 23, par rapport aux 28 étoiles habituellement prévues. L'observateur 6, placé entre les deux lignes polygonales, est moins caractérisé. Il pourrait être associé à NE4, T2/7, T3/7, T4/7, T5/7, UTM1, UTM6, ainsi qu'à NG3, trois groupes observés dans la nuit.

Toutes ces proximités sont en accord avec celles qui avaient été suggérées dans les analyses décrites aux §§ 2 et 3. Le point NG4, quatre groupes observés dans la nuit, est proche de UTM4, UTM7 et des poids T4/7 et T5/7, poids qualifiés de bons. La classification ascendante hiérarchique nous a permis, dans la thèse, de préciser ces proximités et d'associer les classes formées aux poids en temps. Les périodes UTM2 et UTM7 sont celles des mesures de très bonne qualité (T6/7 et T7/7). Au cours des périodes UTM1, UTM4 et UTM6, les mesures sont de qualité très variée. Enfin, les périodes UTM3 et UTM5 sont des périodes où la qualité des mesures est médiocre.

5 Conclusion générale

En plus des résultats spécifiquement astrométriques qui concernent la période 1979 - 1982, l'analyse des correspondances a pu attirer l'attention sur le comportement des observateurs. Dès les premières analyses, on pouvait entrevoir des proximités entre les observateurs et les variables telles que le poids en temps, les groupes et le nombre d'étoiles observées dans un groupe. Ces résultats, qui se sont révélés exacts, ont été accueillis avec la plus extrême prudence et de nombreuses analyses ont été effectuées. Enfin, avec ce regard neuf que donne le passage par un période de doute, on a pu découvrir les caractères majeurs de chacun des observateurs.

L'évolution des méthodes dans le domaine de la détermination de la rotation de la Terre est rapide. Un nouveau service scientifique est entré en fonction le 1er janvier 1988, l'International Earth Rotation Service (IERS). Il n'en reste pas moins que ce qui concerne le facteur humain subsiste. L'analyse des correspondances est une stratégie qui pourrait ouvrir la voie à des recherches analogues sur des échantillons de même type, mais pour d'autres instruments, d'autres pays.

Déjà mise en œuvre par A. Skalli dans l'analyse de la production d'une mine de plomb au Maroc, la démarche suivie ici peut aussi être reprise dans d'autres domaines, dans toute situation complexe où une certaine latitude est laissée aux agents humains dans leur comportement.

Références bibliographiques

F. Chollet, Élimination de certains effets dans les observations à l'astrolabe: application à l'évaluation des corrections aux termes principaux de la nutation (communication faite au symposium UAI de Kiev), in *Nutation and the Earth's Rotation*, E.P. Feodorov, M.L. Smith et R.L. Bender, Reidel (RFA), 1980, pp. 95 sqq.

A. Danjon, *L'astronomie générale*, Paris, Blanchard, 1980.

S. Débarbat, Project MERIT, rapport *Short Campaign*, Observatoire de Paris, Département d'astronomie fondamentale, groupe "Astrolabe", 1980.

S. Débarbat et B. Guinot, *La méthode des hauteurs égales en astronomie*, Paris, Gordon et Breach, 1970.

S. Débarbat et J.C. Hascoët, Trois ans de variations des coordonnées de Paris et de Green Bank, in *Actes du 5ème colloque du groupe GS5*, (1983), édités par Y. Requième, Observatoire de l'Université de Bordeaux I, pp. 139-143.

S. Débarbat et J. Lévy, L'astronomie: hier, aujourd'hui et demain, in *L'astronomie*, Vol. 89, janvier 1975, pp. 7-22.

J. Galmiche, *Temps et latitude fournis par la station Astrolabe de Paris. Application de l'analyse des correspondances à l'étude de la qualité des mesures*, Thèse de 3^e cycle, Laboratoire de statistique du Pr. J.-P. Benzécri, Paris VI, 1986.

J. Kovalevsky, L'astronomie étudie la planète Terre, in *L'astronomie*, Vol. 95, février 1981, pp. 59-76.