

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



Astrophysique/Soleil

Mesures du rayon solaire avec l'instrument DORAYSOL (1999–2006) sur le site de Calern (observatoire de la Côte d'Azur)

*Solar radius measurements with the DORAYSOL instrument (1999–2006) at the Calern site of the observatoire de la Côte d'Azur*Frédéric Morand^a, Ch. Delmas^a, Thierry Corbard^b, Bertrand Chauvineau^c, Abdanour Irbah^d, M. Fodil^e, Francis Laclare^{a,*}^a Univ. Nice Sophia Antipolis, CNRS UMR 6525, observatoire de la Côte d'Azur, station de Calern, 06460 Caussols, France^b Univ. Nice Sophia Antipolis, CNRS UMR 6202, observatoire de la Côte d'Azur, boulevard de l'observatoire, BP 4229, 06304 Nice, France^c Univ. Nice Sophia Antipolis, CNRS UMR 6162, observatoire de la Côte d'Azur, avenue Copernic, 06130 Grasse, France^d CNRS/LATMOS, quartier des Garennes, 11, boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France^e Observatoire d'Alger, CRAAG, BP 63, Bouzareah, 16340 Alger, Algérie

I N F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Reçu le 30 mai 2010

Accepté après révision le 19 octobre 2010

Disponible sur Internet le 17 novembre 2010

Présenté par Jean Kovalevsky

Mots-clés :

Soleil

Rayon

Variations apparentes du diamètre

Mots-clés :

Sun

Radius

Diameter apparent variations

R É S U M É

La série d'observations du rayon solaire sur le site de CALERN à l'Observatoire de la Côte d'Azur s'étend sur près de 30 ans. Les mesures d'abord visuelles, faites par le même observateur, sont devenues progressivement impersonnelles par l'usage de capteurs CCD. Pour améliorer encore le rendement et la qualité des observations du demi-diamètre nous avons réalisé un nouvel instrument : DORAYSOL. Le principe de l'instrument est toujours basé sur le passage du Soleil à hauteur constante mais il permet un plus grand nombre d'observations le même jour par l'emploi d'un prisme d'angle variable. Un système d'acquisition numérique CCD des images du Soleil rend les mesures plus crédibles et l'instrument est semi-automatique par la motorisation de ses principales fonctions. Les résultats présentés ici couvrent huit années d'observations et comptent près de 20 000 mesures obtenues entre 1999 et 2006. Une analyse des principaux biais de mesures instrumentaux montre en particulier que l'écart entre les mesures des passages à l'est et à l'ouest est systématique, ce qui justifie notamment l'utilisation de moyennes pour le calcul du rayon. Ainsi, les mesures obtenues par DORAYSOL sont en bon accord avec celles acquises sur la série antérieure avec l'Astrolabe solaire, qu'il s'agisse de la valeur moyenne du rayon ($959,48'' \pm 0,01''$), de son caractère variable dans le temps ou encore de l'éventuelle dissymétrie apparente de la photosphère observée. Nous souhaitons que ce programme, interrompu depuis 2007 par manque de personnel, soit à nouveau repris pour que les observations du rayon solaire faites au sol soient simultanées à celles obtenues depuis l'espace par la mission PICARD. Nous développons également sur le site de CALERN l'instrument MISOLFA, destiné à évaluer les paramètres qui caractérisent la turbulence au sol et le télescope SODISM 2, réplique du télescope embarqué sur le satellite. Notons que les travaux d'étude, de réalisation et de mise au point de ces deux instruments ont retardé l'analyse des résultats obtenus par DORAYSOL et donc leur exposé dans la présente note. Il convient enfin de souligner que seule, la poursuite de ces mesures pendant une longue durée, permettra la recherche de variations à long terme de la géométrie globale du Soleil.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : francis.laclare@obs-azur.fr (F. Laclare).

A B S T R A C T

The series of measurements of the Solar radius at CALERN site of the observatoire de la Côte d'Azur (OCA) spans about 30 years. Measurements of the Sun were first achieved visually by the same single observer, then gradually grew more man-independent with the use of CCD acquisitions. The DORAYSOL instrument was designed and built up to keep improving the number and the quality of these semi-diameter measurements. The principle of this instrument remains the same as that of the Solar Astrolabe (timing the crossing of a parallel of altitude by the Sun) but a varying prism enables larger numbers of daily measurements. Digital CCD acquisition of images improves the credibility of the data and five computer-driven motors are giving a better control of the attitude of the instrument. The results for eight years and nearly 20,000 measurements are presented. Analysis of instrumental biases shows that differences between East and West measurements are systematic and then allow one to choose the mean values to calculate the Solar radius. This results display a good agreement with the Solar Astrolabe series, namely the mean value of the Sun radius ($959.48'' \pm 0.01''$), its time-dependence and the apparent dissymmetry of the photosphere.

In the framework of the PICARD CNES Space mission, Solar radius ground measurements at CALERN simultaneously with the onboard SODISM telescope were projected. It appeared in 2007 that the maintenance of the DORAYSOL program was not possible alongside the development of the atmospheric turbulence monitor MISOLFA and the preparation for setting up the model of the SODISM 2 telescope, the staff at hand becoming insufficient. We do hope that it will be resumed, in a fully automated way. A continuation of the ground-based series would permit one to detect possible long time variations of the global geometry of the Sun.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abridged English version

The DORAYSOL instrument (Definition et Observation du RAYon SOLaire) was designed and developed at CALERN observatory in view of strengthening the survey of the Solar radius in the framework of the PICARD Space mission. Fig. 1 displays a sketch of DORAYSOL [1]:

- A *Cassegrain reflector* (110 mm diameter; 3450 mm focal length) is horizontally disposed on a rotating plate, in order to ensure azimuth pointing;
- A *varying prism*, whose edge has to remain horizontal and perpendicular to the optical axis, ensures the altitude pointing. Associated with the *mercury surface* materializing the horizon, it allows to image in the focal plane of the telescope the two symmetric components of the Solar edge;
- A *CCD camera* and its acquisition system reconstruct the Solar edge; they also time its transit through the parallel of altitude. A spectral filter limits the wavelength range at a bandwidth of 60 nm around a central wavelength of 548 nm. A *rotating shutter*, in front of the telescope, alternately triggers the acquisition of the direct and reflected images of the Solar edge;
- A *4.5 density filter* and a shield (not sketched here) protect the whole instrument;
- *Five computer-driven motors* pilot the instrument: rotating plate (azimuth), angle of the prism (altitude) and inclination of the density filter. Accurate controls of the horizontality of the edge of the prism and of the optical axis are achieved.

Measurements and the questions the data raise, including their quality, are presented in the first part. The mean radius obtained between 2000 and 2006 is $959.48'' \pm 0.01''$. The second part confirms two results known from the CALERN Astrolabe series: the time-dependence (globally out of phase) with the magnetic activity, and the dissymmetry of the photosphere.

Observations

Observations with this new instrument started in 1999 while the Solar radius survey, initiated in 1978 with the Solar Astrolabe, was extended for the sake of controlling the new results. The strong point of both instruments lies [2] in timing the upper and lower edges of the Sun when they cross the same parallel of altitude, a few minutes apart, the atmospheric refraction being the same (at the first order); these corrective terms eventually cancel each other in the process of calculating the semi-diameter. Favorable DORAYSOL features are: many quasi-automatic CCD measurements (up to 80 a day) and the possibility of evaluating parameters linked to the image quality (scattering effect around regression lines). Two difficulties remain unsolved: possible focal length variations if a few minute thermal changes occur, which are unverifiable (opposite to the Astrolabe) and the variable prism displaying a constant discrepancy between East and West measurements (Fig. 2). Nevertheless, the similar conditions of observation (mean zenith distances and Sun position angles) at both sides of

the meridian provide a stable difference of $0.03''$ between East and West regression lines for the radii, making it possible to choose the arithmetic mean as the relevant value. Let us notice that a new varying prism was built up to cope with these problems but it has not yet been operated.

As it was the case with the Astrolabe [3], a zenith distance effect arises (Fig. 3) between 60° and 30° , that might be linked with outside thermal variations: Eastward, the radius is greater by $0.13''$ at low zenith distances, correlated with a serious increase in temperature (up to 5°C in the morning). Westward, the radius is smaller by $0.09''$ at 30° than at 60° , with a smaller change of 0.5°C in the afternoon temperature.

As regards the image quality, let us recall their acquisition procedure, tested since 1989 on the Astrolabe [4]: the 752×582 pixels camera covers a field of $379''$ by $287''$ on the sky, with a 60 nm bandwidth centered at 548 nm . The inflexion point on a CCD line is detected by numerical derivatives [5] and the modeling of the Sun edge allows several choices and is still being debated [6,7]. The time accuracy of recording events is about $15\ \mu\text{s}$, well above the needed precision. A crossing of an edge is determined from the acquisition of 50 direct and 50 reflected images, each one lasting 250 ms .

The Fried parameter can be evaluated [8,9] to an average of $r_0 = 4\text{ cm}$. Nevertheless we think that the exposure time (20 ms) and the 25 s acquisition time are not perfectly relevant for such a characterization. A better marker of the image quality seems to be the rms scattering around the data regression lines, with an average of $1.35''$ ($1.30''$ in the morning, better than $1.45''$ in the afternoon) as shown on Figs. 4(a) and 4(b). One can also notice that the spreading of images, proportional to the scattering, reduces the value of the radius because of the shift of the inflexion point towards the center [10]. We could use this index to qualify and weight the measurements, but we preferred to keep the plain data. We did use it to eliminate the data related to a dysfunction of the rotating shutter.

Figs. 5(a) and 5(b) compare the statistical characteristics of both instruments, after discarding 191 DORAYSOL measurements farther than 3σ from the annual averages as well as the 1999 “experimental” data. The 19169 retained DORAYSOL measurements give on Fig. 5(b) a Gaussian histogram, justifying the definition of the radius as the average between East and West observations. The root mean square is the same for the two series, $\sigma = 0.32''$.

Results

DORAYSOL mean radius of $959.48'' \pm 0.01''$ with $\sigma = 0.32''$ is deduced from 11663 Eastern ($959.79''$, $\sigma = 0.30''$) and 7506 Western measurements ($959.17''$, $\sigma = 0.34''$). To compare with the 371 Solar Astrolabe observations between years 2000 and 2006, it would be relevant to correct DORAYSOL data by the zenith distance effect giving $959.51'' \pm 0.01''$ with $\sigma = 0.32''$ to compare with $959.55'' \pm 0.01''$ with $\sigma = 0.26''$ for the Astrolabe. Fig. 6 displays a good consistency between the two series, especially if the zenith distance effect ($0.07''$ increase over the raw measurements) is taken out from the Astrolabe data. The remaining discrepancy is probably due to a combination of the differences in spectral sensitivities, filters, observational procedures, and/or the low density of the Astrolabe data.

Fig. 6 also shows the regression line of monthly means of the Solar activity, whose slope is the exact opposite of the Astrolabe and DORAYSOL's ones. This opposition is a feature of the CALERN series and it is well known that different results are obtained by different instruments [11,12]. So, we expect that the data from space will solve the problem. We would like recalling the good agreement with the selective data of the Solar Disk Sextant [11,13]. The conclusion is that, for the Sun parameters variations, long time-series are needed [14,15]: The first 10 years (Fig. 6) show a phase opposition between the Solar radius and the Solar magnetic activity, followed by 15 years of evolution, leading at the beginning of cycle 23 (April 1996 to June 1998) to in-phase variations as shown by SOHO/MDI [16]. Finally, at the end of cycle 23, as shown on Fig. 7, DORAYSOL data confirm a seemingly opposing phase.

As regards the shape of the photosphere, the Astrolabe already gave a few indications [15], supported by measurements in the southern hemisphere [17,18]. On Fig. 8(a), points of equal heliographic latitudes have been plotted for the Astrolabe (1 point stands for 1100 measurements) and DORAYSOL (1 point = 2700 measurements) in the range (20° – 90° , the equatorial zones being out of reach from CALERN). The adjusted parabolas look alike.

The higher density of DORAYSOL data is given in Fig. 8(b), which covers 20° – 160° heliographic inclinations. The deviations from the mean radius are computed every year and are unaffected by the previously mentioned systematic East–West effect. The smoothing with an 8-degree polynomial gives a correlation of 0.83. Nevertheless, the limit of accuracy of such instruments is reached, these deviations being not recorded at the same times and high zenith distances measurements being of a lesser quality.

Let us stress that the 2007 interruption of this program was decided by the OCA in view of the priority put on the PICARD ground segment project and the lack of dedicated staff. The 3-year delay for publishing this article can be accounted as well. We hope that it will be possible to resume the DORAYSOL series to foster the data of MISOLFA and SODISM 2 (the same as the onboard imager).

Conclusion

The new CALERN instrument made it possible to measure some 20000 Solar radii during 8 years, twice more than the Solar Astrolabe in 30 years. These personal-free data display the same quality and give the same values and time variations as the visual ones, over their common observing periods. Nevertheless, this period is too short compared with the Sun cycles to draw conclusions from DORAYSOL as we did with the Astrolabe [14,15]. The varying prism should be substituted by a

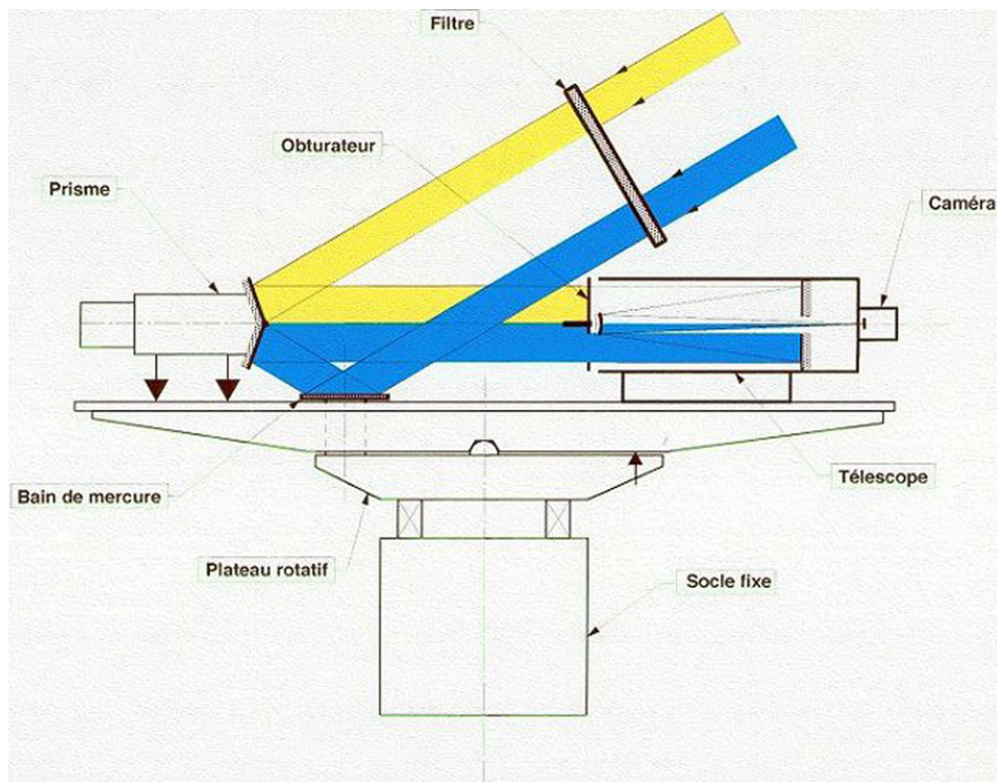


Fig. 1. L'instrument DORAYSOL.

Fig. 1. The DORAYSOL instrument.

more metrological one [19] and a thorough automation would optimize the ground measurements of DORAYSOL. Only space observations will provide answers to the questions raised by the last decades of ground data, but a long time survey of the Sun would be easier from the ground than from short-lived satellites. Calibrating the atmosphere distortion by simultaneous space and ground measurements at well chosen sites seems to be an urgent task. Along with PICARD satellite, the telescopes MISOLFA and SODISM 2 will fill the gap at CALERN site. DORAYSOL could play its part in this exciting course.

1. Introduction

Dans le but de continuer à l'Observatoire de CALERN le programme de surveillance du rayon solaire couvrant près de 30 ans, et dans la perspective de la mission spatiale PICARD nous avons étudié et développé un nouvel instrument : DORAYSOL (Définition et Observation du RAYon SOLAire) (Fig. 1).

Cet instrument présente de nombreux avantages par rapport à l'Astrolabe solaire dont il a gardé le principe de l'observation du passage du Soleil par un cercle de hauteur [2]. Il permet d'une part, de manière quasi-automatique un grand nombre de mesures par l'emploi d'un prisme d'angle variable, d'autre part ces mesures sont impersonnelles par l'usage d'une caméra CCD située dans le plan focal et enfin, elles rendent possible une évaluation objective de certains paramètres affectant la qualité des images.

Les éléments constituant l'instrument [1] sont :

- Un télescope de type Cassegrain, de 110 mm de diamètre de miroir primaire et de 3450 mm de focale. Ce télescope est disposé à l'horizontale sur un plateau rotatif qui permet d'assurer le pointage en azimut de l'instrument ;
- Un prisme réflecteur d'angle variable dont l'arête doit être horizontale et perpendiculaire à l'axe optique, associé à un bain de mercure qui matérialise le plan de l'horizon permettent de former dans le plan focal du télescope les deux composantes symétriques de l'image du bord solaire. La variation de l'angle du prisme permet d'assurer le pointage en hauteur de l'instrument ;
- Une caméra CCD et son système d'acquisition permettent de reconstituer et de dater le passage du bord solaire par le cercle de hauteur. Un filtre, centré sur 548 nm de longueur d'onde et d'une largeur de 60 nm, est placé devant la caméra et limite la bande spectrale observée. Enfin, un obturbateur en rotation, situé à l'entrée du télescope, déclenche alternativement l'acquisition des images directe et réfléchie du bord solaire ;
- Un filtre, constitué d'une lame plan-parallèle en borosilicate crown (BK7), de densité voisine de 4,5, ajuste le flux incident aux caractéristiques de la caméra et protège l'instrument dans son ensemble ;
- L'instrument est piloté par 5 moteurs contrôlés par ordinateur. Les trois moteurs de pointage concernent l'azimut (i.e. l'orientation du plateau rotatif), la hauteur (i.e. l'angle du prisme) et le déplacement et l'orientation de la lame filtre.

Deux moteurs de réglage fin permettent de garantir à tout instant la parfaite horizontalité de l'instrument, à la fois longitudinalement (réglage de l'horizontalité de l'axe optique du télescope) et transversalement (réglage de l'horizontalité de l'arête du prisme); la référence étant le plan horizontal matérialisé par la surface du bain de mercure.

2. Mesures

Les observations avec ce nouvel instrument ont commencé en 1999. Le programme de mesures conduit avec l'Astrolabe solaire de manière régulière depuis 1978, a été poursuivi jusqu'en 2006 de manière concomitante à DORAYSOL, à seule fin de contrôler les résultats. L'ensemble des mesures révèle une bonne cohérence apparente des données acquises par les deux instruments sur la période commune entre 1999 et 2006, comprenant près de 20 000 observations faites avec DORAYSOL. Le choix de l'Astrolabe solaire de CALERN pour qualifier les mesures acquises par l'instrument DORAYSOL se justifie d'abord par la présence des deux instruments sur le même site et leur exploitation simultanée mais aussi par la qualité des résultats obtenus avec l'Astrolabe solaire sur la longue série de mesures du diamètre à CALERN.

L'interruption du programme en 2007 a été décidée par notre établissement pour donner la priorité au développement de la composante sol de la mission PICARD comprenant les deux instruments MISOLFA et SODISM 2, [19] qui permettront d'évaluer les paramètres définissant la turbulence. Les travaux qui en ont résulté et le manque de personnel disponible pour ce service, sont la cause du retard de plus de trois ans apporté à l'analyse des mesures DORAYSOL et donc à leur présentation. Nous espérons disposer prochainement des moyens nécessaires à une remise en fonctionnement de DORAYSOL, au moins partielle, qui permettra de valider l'ensemble des observations au sol par comparaison directe avec les mesures que fournira le satellite PICARD. Seul, le rapprochement des mesures faites au sol à celles obtenues depuis l'espace conduira à qualifier et donc à clarifier de manière objective l'ensemble des observations et des résultats obtenus depuis plus de trente ans sur le site de CALERN.

2.1. Effets instrumentaux « et ou » observationnels

Les mesures sont faites au passage Est et au passage Ouest du Soleil, entre 30° et 60° de distance zénithale. En été par ciel dégagé, on peut compter jusqu'à quatre-vingts mesures le même jour. Rappelons aussi l'intérêt de la méthode d'observation du disque solaire à hauteur constante, méthode qui réduit considérablement les incertitudes relatives à la réfraction astronomique, inhérentes à d'autres techniques de mesure du diamètre solaire. Seules interviennent ici les variations des conditions locales de température, de pression et d'hygrométrie pendant les quelques minutes qui séparent les passages des deux bords successifs du Soleil à l'Est ou à l'Ouest par le cercle de hauteur; la réfraction est calculée pour chacun des deux instants de passage. Cependant, malgré les avantages que nous avons cités, DORAYSOL ne possède pas toute la qualité métrologique qui caractérise l'Astrolabe de CALERN :

1. D'une part on ne maîtrise pas, comme on peut le faire avec l'Astrolabe solaire par autocollimation sur un miroir situé en avant de l'objectif, les éventuelles variations de la focale qui affectent la distance zénithale d'observation et qui sont essentiellement liées aux variations thermiques.

2. D'autre part, le prisme d'angle variable, bien que construit avec précision au laboratoire des prototypes du C.N.R.S. est de nature composite puisqu'il est constitué d'un ensemble mécanique sur lequel sont serties les lames réfléchissantes. Cet ensemble présente quelques imperfections, eu égard à la précision recherchée. Dès la mise en service de l'instrument, on a constaté un effet persistant affectant les résultats, les rayons mesurés à l'Est étant systématiquement supérieurs à ceux observés à l'Ouest d'environ 0,60". Sur la totalité des mesures traitées année par année entre 1999 et 2006, l'écart moyen est : (EST-OUEST) = 0,60" ± 0,04".

Nous n'avons pas été en mesure d'éliminer ce défaut qui a très certainement son origine dans le système opto-mécanique du prisme dont l'arête n'est pas ou mal définie. L'origine la plus plausible de cette différence entre les résultats Est et Ouest résulte du fait que l'observation du Soleil ne correspond pas au passage par le cercle de hauteur mais plutôt par un petit cercle dont le pôle n'est pas le zénith. Ce petit cercle sur la sphère locale est alors incliné sur le cercle de hauteur d'un angle identique à l'Est comme à l'Ouest. Il en résulte que les temps de passage sont systématiquement plus longs à l'Est et plus courts à l'Ouest d'une quantité équivalente, qui est fonction des valeurs de l'angle à l'astre et de la distance zénithale.

Sur l'ensemble de la série 1999–2006 nous avons des conditions d'observations analogues à l'Est comme à l'Ouest, notamment pour la distance zénithale et l'angle à l'astre moyens observés, la distance zénithale moyenne étant de 47° et la valeur absolue de l'angle à l'astre de 50°. Cette symétrie des conditions d'observations du matin et du soir contribue à rendre stable l'écart (Est–Ouest) et justifie la définition du rayon moyen par la moyenne des rayons Est et Ouest. La Fig. 2 illustre la stabilité de l'écart déduit des droites de régression ajustées sur les séries mensuelles établies à l'EST et à l'OUEST, dont la variation n'excède pas 0,03" entre mars 2000 et octobre 2006.

3. De la même manière qu'il existait sur l'Astrolabe solaire un effet lié à la hauteur d'observation [3], cet effet apparaît sur les mesures DORAYSOL et en particulier sur celles obtenues à l'EST, la valeur du rayon devenant plus grande aux faibles distances zénithales. L'accroissement du rayon mesuré est ainsi de 0,13" entre 60° et 30° de distance zénithale le matin.

La pente est de signe contraire et plus faible pour les observations à l'Ouest, le rayon augmentant de 0,09" entre 30° et 60° de distance zénithale. Ce désaccord entre Est et Ouest pourrait résulter des variations de température importantes pendant la matinée, pouvant atteindre 5 °C et nettement plus faibles durant l'après midi, en deçà de 0,5C (Fig. 3).

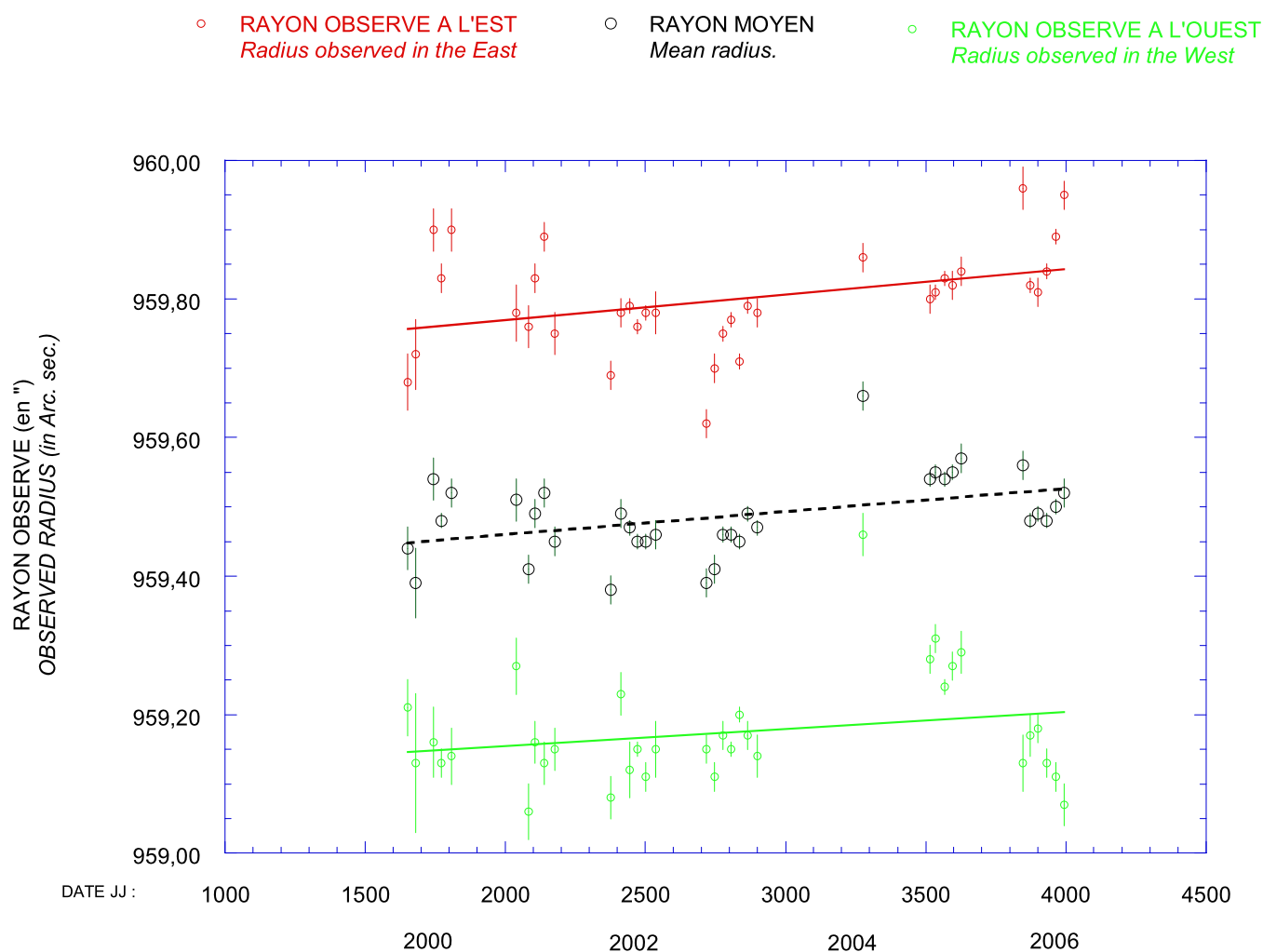


Fig. 2. DORAYSOL 2000–2006, stabilité de l'écart [Est–Ouest].

Fig. 2. DORAYSOL 2000–2006, stability of the East–West discrepancy.

2.2. Qualité des mesures

– Le mode d'acquisition des images à partir de la caméra CCD était en usage sur l'Astrolabe solaire depuis 1989 [4]. D'abord en mode analogique ce type d'enregistrement est devenu numérique à partir de 1996. La caméra installée sur DORAYSOL comporte 752×582 pixels, le champ ainsi couvert par la matrice étant de $379''$ sur $287''$. Pour la détection du point d'inflexion, nous avons encore utilisé la méthode par dérivation numérique déduite du mode analogique [6,5], la modélisation du bord solaire observé par DORAYSOL et d'autres instruments similaires faisant toujours l'objet d'investigations [7].

Les acquisitions de chaque image sont datées à partir de la carte chronomètre pilotée par les fréquences de 1 MHz et 1 Hz fournies par une horloge à césium de l'observatoire. La précision des instants observés est de l'ordre de $15 \mu\text{s}$, donc largement suffisante pour la seule détermination du demi-diamètre.

Chaque pixel est caractérisé par 256 niveaux d'éclairement. La dimension utile du pixel, étalonnée en distance zénithale est de $0,50''$ tandis qu'elle est de $0,49''$ sur l'axe des azimuts. Rappelons que l'enregistrement d'un passage comprend l'acquisition de 100 images (50 directes et 50 réfléchies) toutes les 250 ms et que chaque image est acquise en 20 ms.

Le système de traitement des données permet d'évaluer le paramètre de Fried [8] rendant compte de l'aire de cohérence au niveau de la pupille [9]; ce paramètre est voisin de 4 cm en moyenne pour l'ensemble des mesures dont nous disposons. Cependant, nous pensons que le temps de pose et la durée du passage de 25 s sont trop grands pour que ce paramètre conserve ses caractéristiques significatives. En revanche, la dispersion des mesures sur les droites ajustées aux trajectoires (écart quadratique moyen des mesures) demeure quant à elle un indice objectif de la qualité des observations. Sur l'ensemble de la série, cette dispersion moyenne est de $1,35''$ et comme on pouvait s'y attendre, elle est sensiblement plus grande l'après-midi, de $1,45''$ contre $1,30''$ le matin. Cette détérioration sur les passages Ouest était perceptible avec l'Astrolabe solaire bien que non quantifiable. Elle résulte très probablement de la turbulence due au bilan thermique environnant l'instrument et dans les basses couches de l'atmosphère sur le site; la température l'après midi est en moyenne supérieure de 2°C à celle du matin.

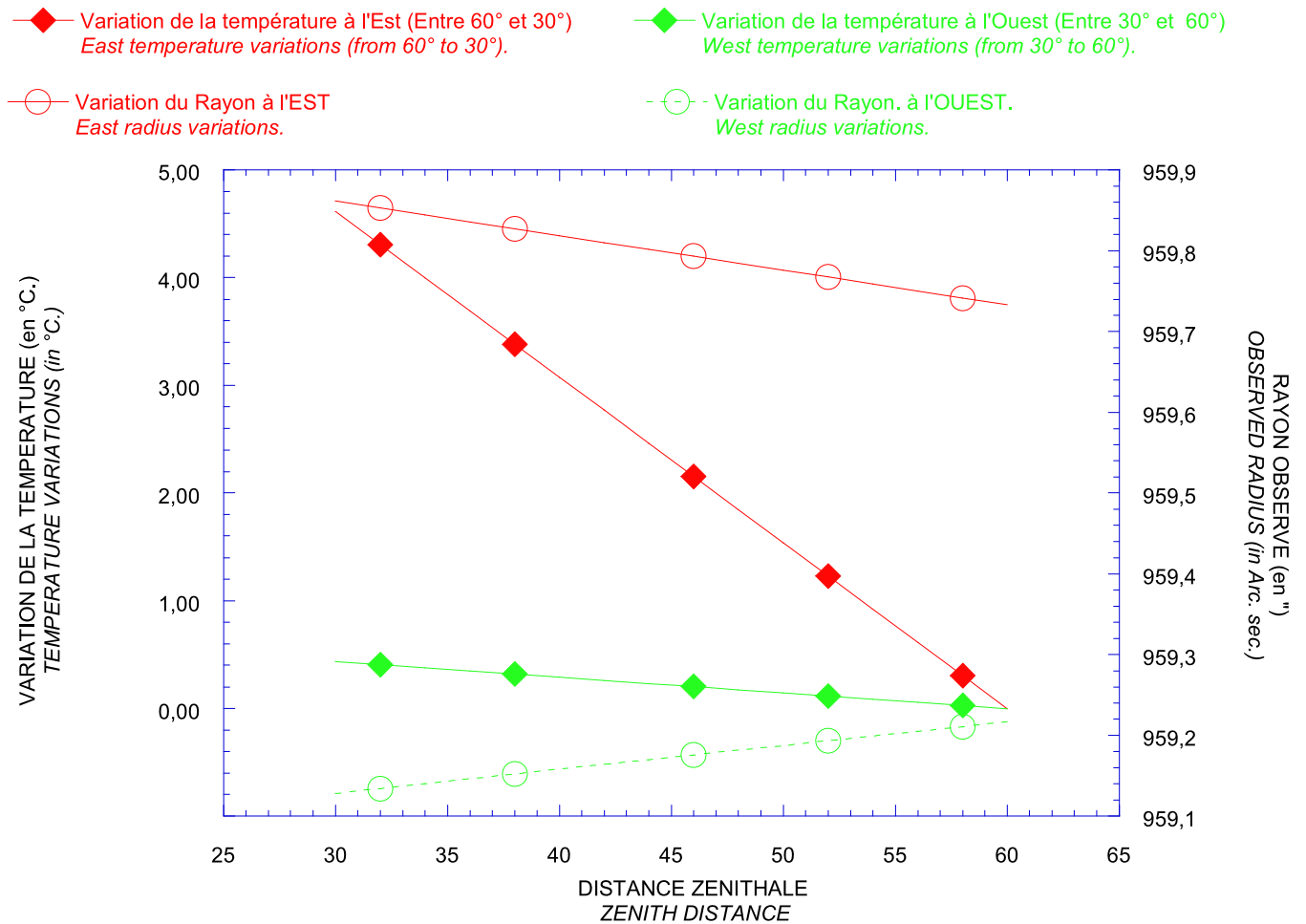


Fig. 3. DORAYSOL 2000–2006, variation de la température et du rayon observé.

Fig. 3. DORAYSOL 2000–2006, variations of temperature and observed radius.

Les observations à l'Est ou à l'Ouest, Figs. 4(a) et 4(b), confirment également la relation connue entre l'étalement de l'image, fonction de la dispersion, et le retrait du point d'inflexion vers le centre réduisant alors la valeur du rayon observé [10].

Cet indice de dispersion permettrait de manière indubitable la qualification des mesures. Néanmoins, dans le but de maintenir le caractère brut des observations, nous n'avons pas fait usage de pondération pour les résultats présentés dans cette Note.

– Sur l'ensemble des observations réparties entre 2000 et 2006, soit 19 360 mesures, nous avons été conduits à éliminer 191 mesures s'écartant à plus de 3σ de la valeur moyenne, soit près de 1% sur l'ensemble des observations. L'acquisition de ces mesures était douteuse, assez fréquemment par suite d'une mauvaise synchronisation de l'obturateur en rotation et de l'enregistrement des images. Par ailleurs nous considérons l'année 1999 comme une période de mise au point de l'instrument, qui ne doit pas être prise en compte pour apprécier la qualité des résultats de DORAYSOL. La Fig. 5(b) représente l'histogramme de l'ensemble des observations ainsi retenues. Nous nous sommes assurés que la distribution des mesures DORAYSOL est gaussienne, ce qui confirme le bien fondé de la définition du rayon moyen obtenu par la moyenne des observations Est et Ouest.

Pour comparaison, les Figs. 5(a) et 5(b) donnent la distribution des mesures obtenues avec l'Astrolabe solaire et DORAYSOL. Rappelons que les observations faites avec l'Astrolabe solaire sont ramenées au zénith ; les caractéristiques statistiques des deux séries sont voisines, notamment pour les écarts type qui sont identiques, égaux à $0,32''$.

3. Resultats

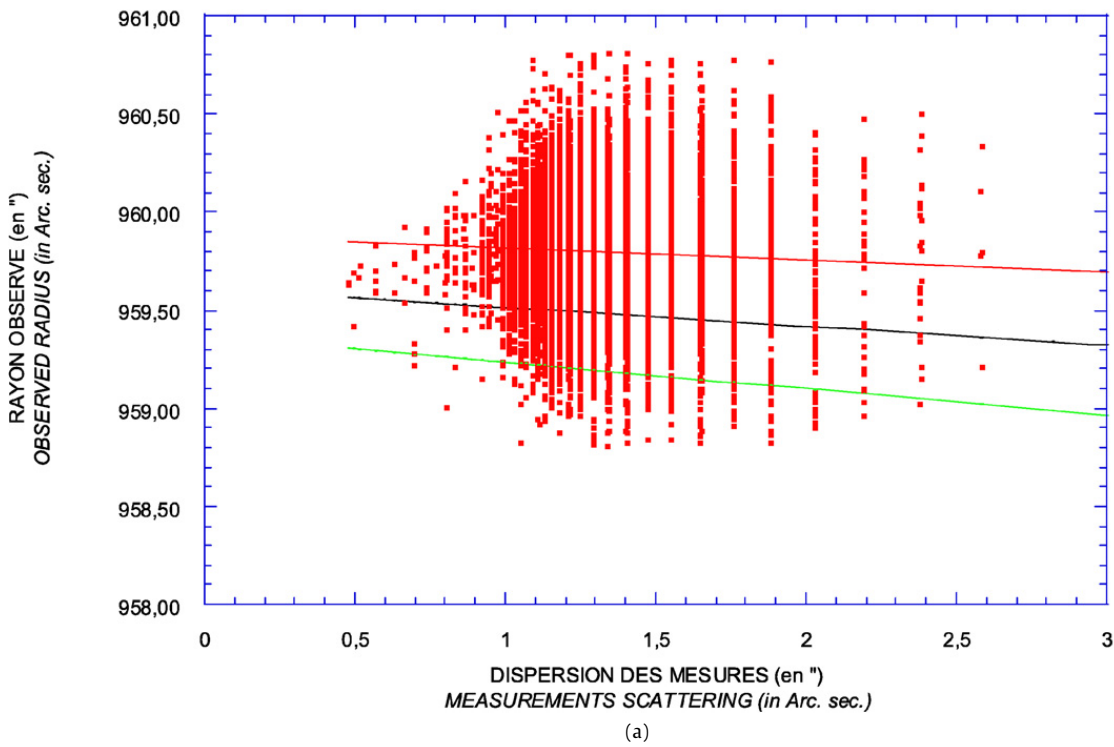
3.1. Valeur moyenne et variations apparentes du rayon

Un premier exposé des mesures acquises par DORAYSOL entre 1999 et 2003 montrait le bon accord des mesures Astrolabe solaire et DORAYSOL sur le site de CALERN et aussi l'opposition de phase apparente entre rayon observé et activité magnétique [19]. La période couverte par nos observations correspondait alors au sommet du cycle 23 et au début de la phase descendante de l'activité. La poursuite du programme que nous présentons ici concerne en outre la fin du déclin du

AJUSTEMENT SUR LES RAYONS MOYENS.
Fit on the mean radii.

AJUSTEMENT SUR LES MESURES OUEST.
Fit on West measurements.

MESURES A L'EST
East measurements.



AJUSTEMENT SUR LES RAYONS MOYENS.
Fit on the mean radii.

AJUSTEMENT SUR LES MESURES EST.
Fit on East measurements.

MESURES A L'OUEST
West measurements.

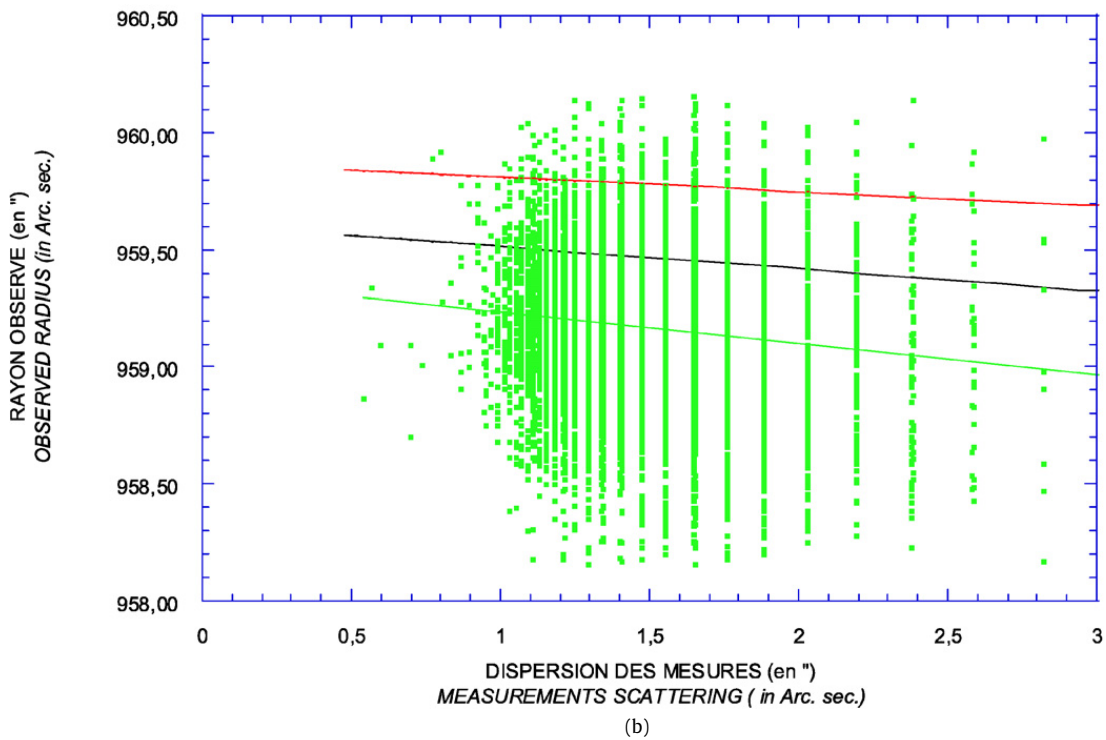
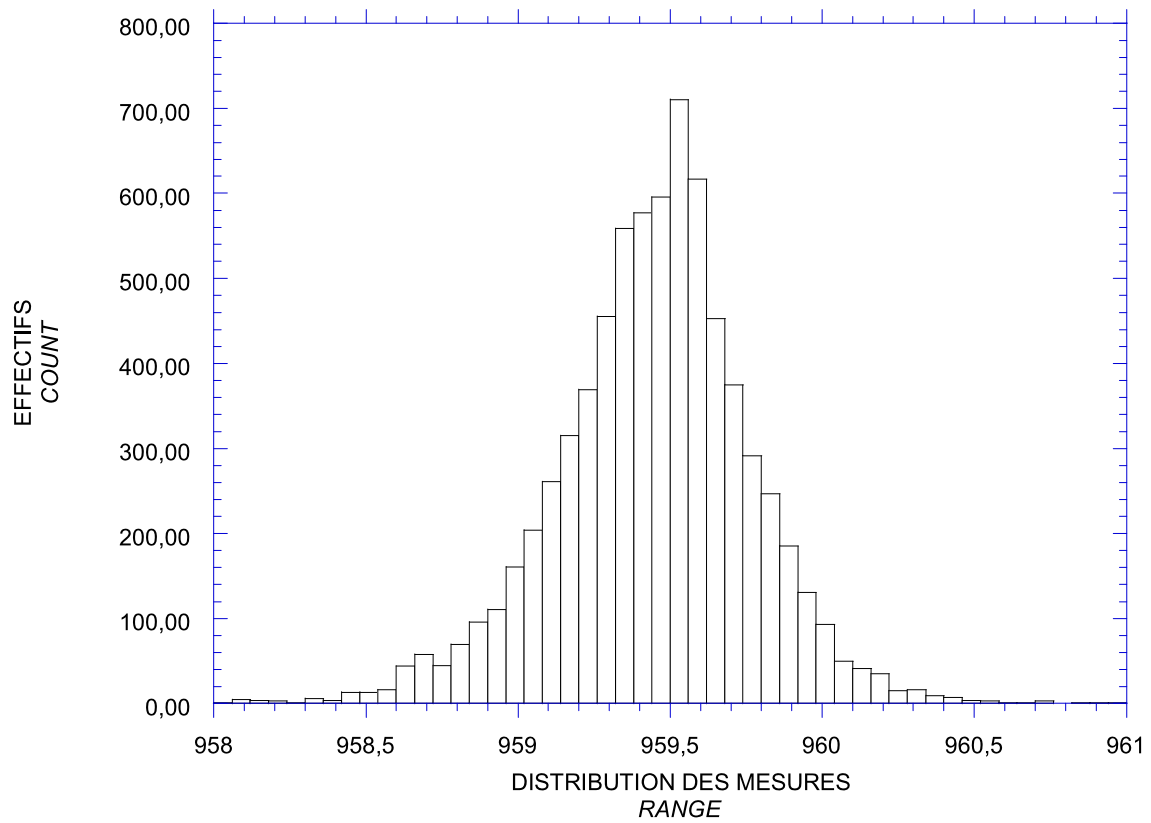
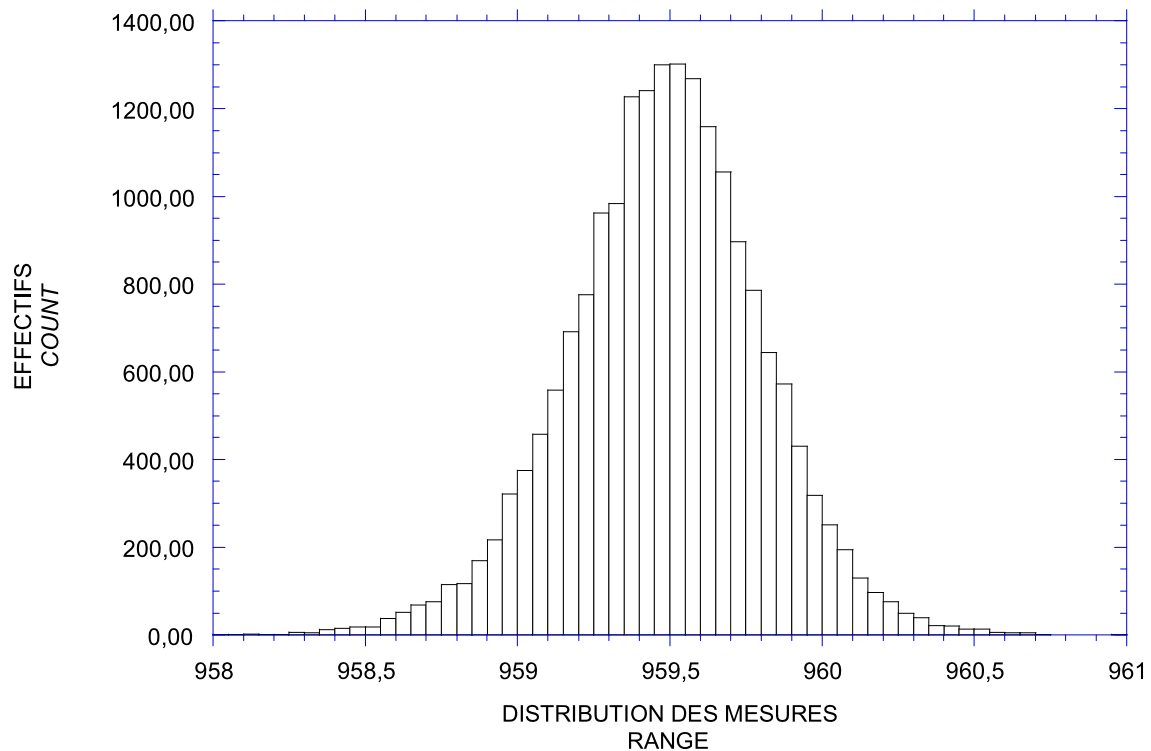


Fig. 4. (a) DORAYSOL 2000–2006, dispersion des mesures à l'Est; (b) Dispersion des mesures à l'Ouest.

Fig. 4. (a) DORAYSOL 2000–2006, eastward scattering of measurements (in arc.sec); (b) Westward scattering of measurements (in arc.sec).



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Histogramme ASTROLABE SOLAIRE (1975–2006, 7279 mesures visuelles à sec $z = 1$, $R = 959,52'' \pm 0,01''$) (observateur : F. Laclare); (b) Histogramme DORAYSOL (2000–2006, 19 169 mesures CCD, $R = 959,48'' \pm 0,01''$).

Fig. 5. (a) Solar Astrolabe (1975–2006, 7279 visual measurements at sec $z = 1$, $R = 959.52'' \pm 0.01''$) (observer: F. Laclare); (b) DORAYSOL (2000–2006, 19169 CCD measurements, $R = 959.48'' \pm 0.01''$).

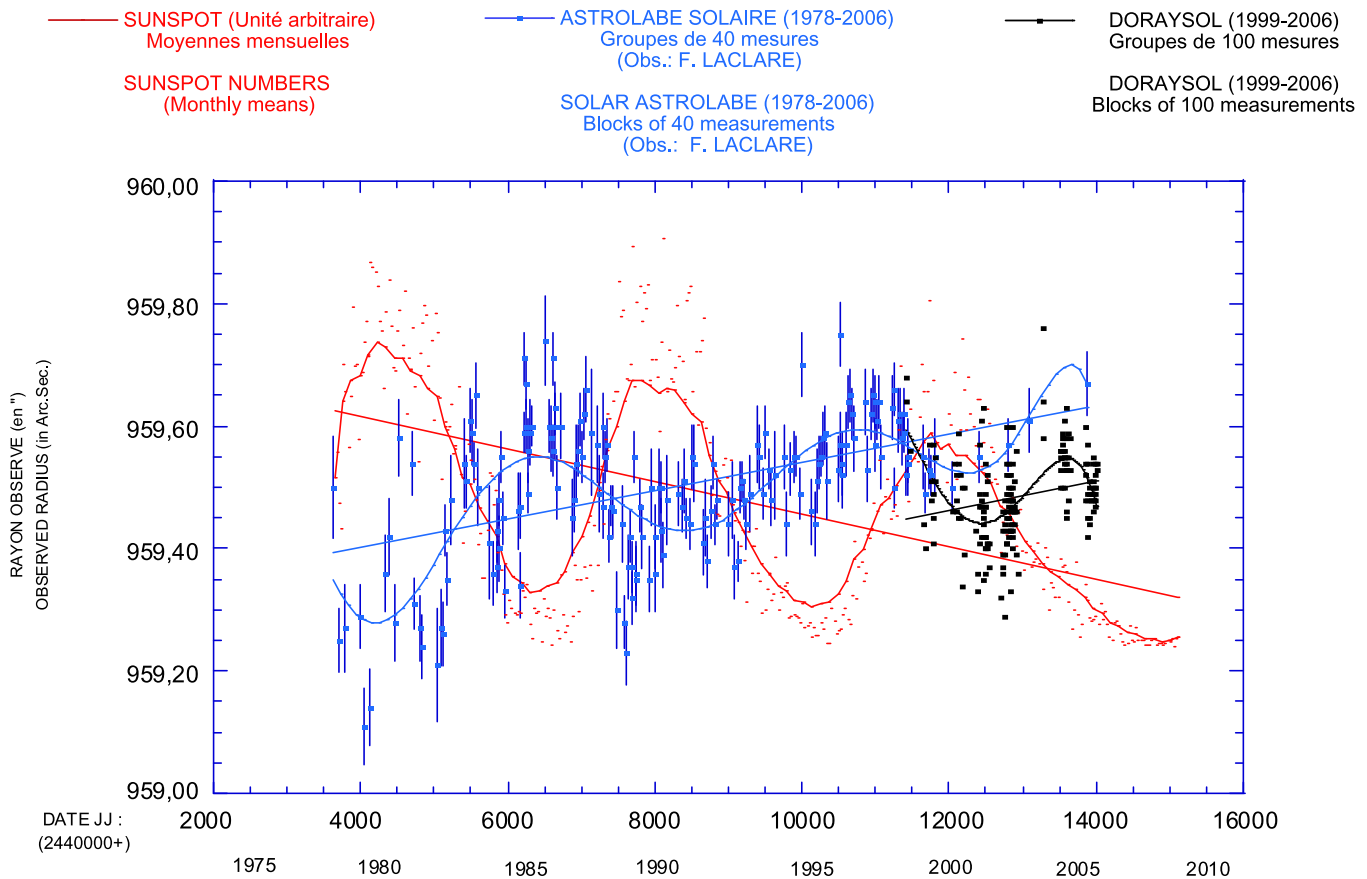


Fig. 6. Mesure du rayon à CALERN et activité magnétique (1978–2006).

Fig. 6. Solar radius at CALERN and magnetic activity (1978–2006).

cycle 23 avant le long minimum d'activité qui caractérise ce cycle. Notons aussi que l'analyse de l'ensemble des mesures DORAYSOL, qui a été réalisée pour la présentation de cette note, conduit à une meilleure définition des valeurs observées qui permettra leur future exploitation.

Le rayon moyen DORAYSOL défini comme nous l'avons écrit à partir des mesures Est et Ouest entre 2000 et 2006, soit 19 169 observations, est de $959,48'' \pm 0,01''$ avec un écart quadratique moyen $\sigma = 0,32''$. Cette valeur moyenne étant déduite de l'ensemble des mesures à l'Est, soit 11 663 observations, pour une valeur moyenne de $959,79''$ avec un écart type $\sigma = 0,30''$ et de 7506 mesures à l'Ouest dont la valeur moyenne est de $959,17''$ et l'écart type $\sigma = 0,34''$. La grande différence entre les effectifs de mesures à l'Est et à l'Ouest résulte de la fréquente nébulosité qui affecte le site de CALERN, notamment en été, après le passage du Soleil au méridien.

Pour mieux comparer les séries, si nous tenons compte de l'effet de distance zénithale comme nous l'avons fait pour l'Astrolabe solaire, les mesures de DORAYSOL ramenées au zénith (sec $z = 1$) conduisent à la valeur moyenne du rayon de $959,51'' \pm 0,01''$ avec la même dispersion $\sigma = 0,32''$. Cette valeur est à rapprocher de celle obtenue avec l'Astrolabe solaire de CALERN durant la même période, de 2000 à 2006 comprenant 371 observations, qui est de $959,55'' \pm 0,01''$ avec un écart type $\sigma = 0,26''$.

Une bonne cohérence des variations des mesures visuelles de l'Astrolabe solaire et CCD faites avec DORAYSOL apparaît sur la Fig. 6. Les mesures Astrolabe solaire et DORAYSOL sont approximées par un polynôme de degré 8, l'activité magnétique est interpolée sur les moyennes mensuelles.

L'écart sur les deux séries de mesures du rayon est d'environ $0,1''$ entre 1999 et 2006. Il pourrait sembler peu significatif étant donné la faible densité d'observations assurées avec l'Astrolabe solaire à partir de 2001 mais il rend certainement compte des différences de sensibilités spectrales entre les modes d'observations visuel et CCD et aussi de la transmission par des filtres différents utilisés sur chaque instrument. Rappelons en outre que l'ensemble des mesures faites avec l'Astrolabe solaire sont corrigées de l'effet de distance zénithale, très stable sur toute la série, et que ces mesures ainsi ramenées au zénith sont d'environ $0,07''$ supérieures aux mesures brutes.

– Notons que les droites ajustées sur les séries Astrolabe solaire et DORAYSOL sont parallèles et de signes contraires à celle ajustée sur les moyennes mensuelles de l'activité magnétique.

La Fig. 6 montre sur les 10 premières années une assez nette opposition de phase entre rayon et activité magnétique qui évolue ensuite pendant les 15 années qui suivent. C'est ainsi qu'apparaît au début du cycle N°23 pendant 26 mois, entre avril 1996 et juin 1998, une apparente variation du rayon en phase avec l'activité qui a été observée également depuis

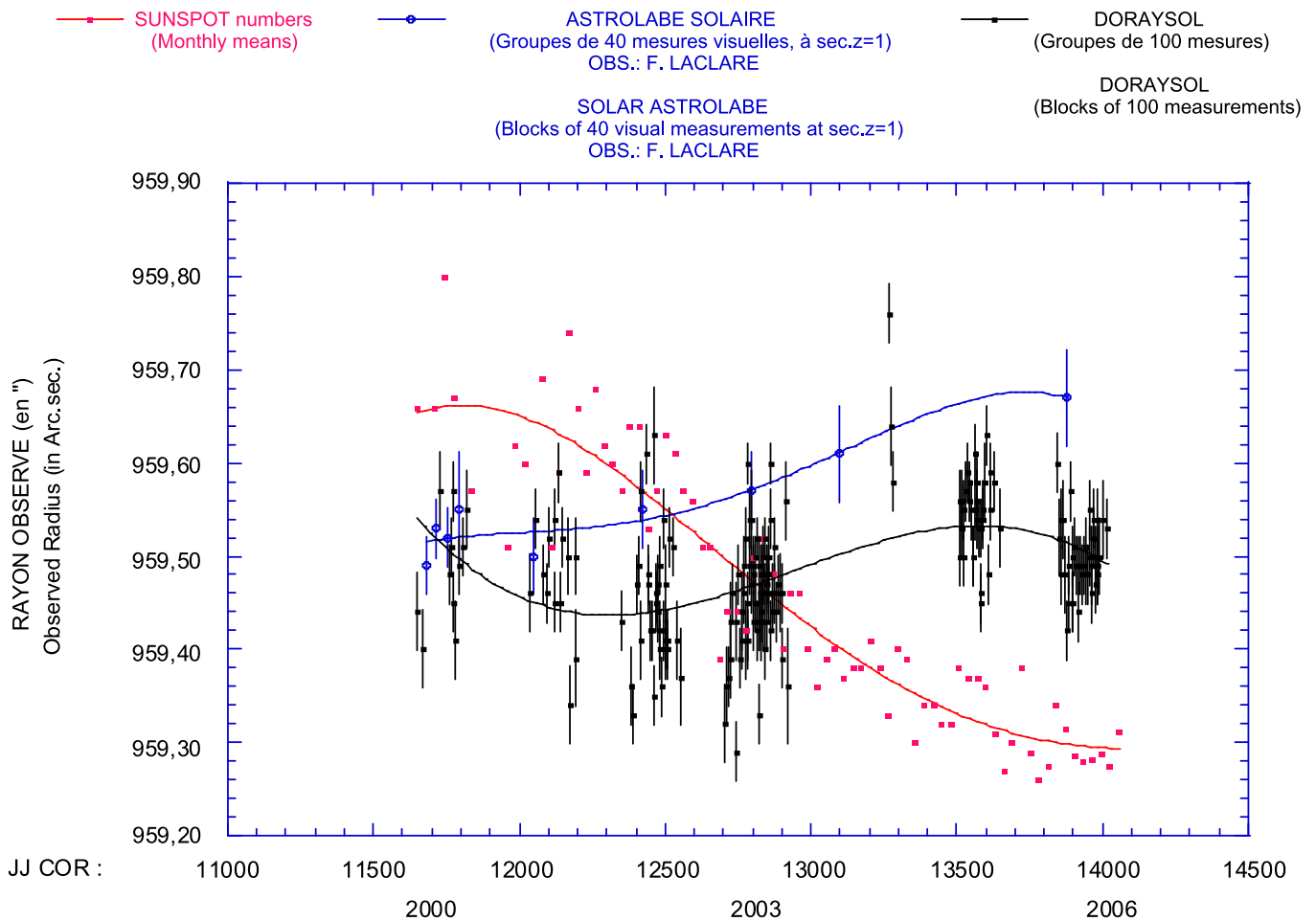


Fig. 7. Rayon et activité magnétique, fin du cycle 23 (2000–2006).

Fig. 7. Solar radius and Magnetic activity, end of cycle 23 (2000–2006).

l'espace à partir de l'expérience SOHO/MDI [16]. Cet aspect montre bien la nécessité de très longues séries de mesures pour conclure à l'existence ou non de la corrélation entre rayon et activité [20].

Les observations de DORAYSOL montrent sur la Fig. 7, en prolongement de la série de l'Astrolabe solaire, la relative persistance de la relation « rayon–activité » pendant l'intervalle 2000–2006 correspondant à la fin du cycle d'activité N°23. Mentionnons que l'année 2004 ne compte qu'un assez faible nombre d'observations (306), réparties en fin de campagne pendant les mois de septembre et octobre et donc à grandes distances zénithales.

3.2. Variations du rayon détectées par d'autres instruments

– Les observations faites à partir de techniques variées sur des sites de qualité inégale et traitées de manières diverses peuvent effectivement conduire à des résultats différents voire divergents. Il en va de même à partir d'instruments issus de l'Astrolabe de Danjon. Dans ce cas, précisons encore, que sous ce même vocable d'Astrolabe, les instruments servant à l'astrométrie solaire peuvent être de conception radicalement distincte et donc aboutir à des résultats disparates [11,12]. Rappelons que l'Astrolabe solaire de CALERN, unique dans son genre, a été conçu pour assurer exclusivement la surveillance du diamètre solaire contrairement à d'autres Astrolabes destinés aussi à l'astrométrie stellaire et dès lors moins adaptés à la seule observation du rayon solaire. Cependant, bien qu'un seul et même observateur ait conduit l'ensemble du programme de mesures sur l'Astrolabe solaire de CALERN, il subsiste une incertitude liée à l'appréciation personnelle de la mesure (équation personnelle); cet inconvénient affecte tous les instruments utilisant la méthode visuelle. L'usage de capteurs CCD contribue amplement à pallier cette incertitude et l'emploi de tels systèmes sur des Astrolabes solaires s'est généralisé ces dernières années; il a conduit à la mise en place d'une organisation appropriée : le Réseau de suivi au Sol du Rayon Solaire, (R2S3) [19]. Une première analyse faite à partir d'Astrolabes équipés de CCD montre une cohérence remarquable sur trois séries de mesures du rayon acquises en 2001 sur les astrolabes solaires situés au Brésil, en Turquie et sur DORAYSOL à CALERN [21].

– La corrélation ou l'anticorrélation entre rayon et activité solaire observées au sol par différentes méthodes ont fait et font encore l'objet de multiples points de vue le plus souvent contradictoires. Ces divergences résultent pour une grande part des moyens utilisés mais aussi des périodes de surveillance du rayon solaire et de leurs durées. Le but de cette note

n'est pas d'exposer les différentes techniques et les résultats obtenus mais au nombre de ceux qui se rapprochent le plus de nos mesures en signe et en valeur absolue citons les mesures faites en ballon dans la stratosphère entre 1992 et 1996 par l'instrument S.D.S. (SOLAR DISK SEXTANT). Bien que les mesures de S.D.S. n'aient pas le caractère continu de notre programme, la cohérence des valeurs du rayon observé par les deux méthodes entre 1992 et 1996 contribue à qualifier nos observations faites depuis le sol [7,13].

3.3. Figure apparente de la photosphère

Un autre aspect de ces résultats concerne la forme de la photosphère observée avec l'instrument DORAYSOL.

A partir des mesures visuelles de l'Astrolabe solaire, nous avons détecté une légère variation du rayon en fonction de sa latitude héliographique, le rayon étant plus grand d'environ 0,03'' aux latitudes moyennes, dans la zone royale, tandis qu'il diminuait sensiblement d'environ 0,05'' autour de 75° de latitude [3]. Notons que les observations faites à CALERN ne donnent pas accès aux régions équatoriales contrairement aux mesures faites à l'observatoire de VALINHOS au Brésil, qui semblent en accord avec celles de CALERN [17].

D'autres observations visuelles faites avec l'astrolabe à SANTIAGO du CHILI pourraient également aller dans le même sens [18]. Ces mesures appellent cependant quelque réserve, puisque l'instrument en usage à Santiago n'est pas identique, par construction, à celui de CALERN. Il en résulte une différence sensible quant à la qualité, caractérisée par un écart type de 0,50'' au Chili tandis qu'il est de 0,28'' à CALERN. Mentionnons également la grande amplitude de la variation du demi-diamètre observée entre 1991 et 2003, de l'ordre de 1'' à Santiago qui est 5 à 6 fois supérieure à celle observée sur la même période à CALERN et enfin l'apparente opposition de phase des deux séries.

Sur la Fig. 8(a) nous avons reporté l'ensemble des écarts au rayon moyen annuel observés visuellement avec l'Astrolabe solaire ou avec le système CCD DORAYSOL dans le quadrant de 20° à 90°. Chaque point compte en moyenne 1100 mesures pour l'Astrolabe solaire et 2700 pour DORAYSOL. Les arcs de paraboles ajustées dans les deux séries présentent une assez grande similitude.

Les observations de cette « asphéricité » qui révèlent des valeurs du rayon photosphérique plus basses à haute latitude semblent confirmées par les mesures obtenues au télescope du Mont Wilson et aussi par l'héliomètre de J. Rösch au Pic du Midi [22].

La densité de mesures avec DORAYSOL permet de mieux répartir cet effet sur l'intervalle de 20° à 160° d'inclinaisons héliographiques, Fig. 8(b). Les écarts à la valeur moyenne du rayon, corrigée de l'effet de distance zénithale, sont calculés chaque année. Ils ne sont pas affectés par l'écart systématique Est–Ouest que nous avons discuté et qui ne concerne que les seules valeurs des rayons observés. Les observations des années 1999 et 2004 ne couvrant que trop partiellement l'année ne permettent pas une bonne répartition des inclinaisons, elles n'ont pas été retenues ; on dispose ainsi d'un ensemble de 18 862 écarts au rayon moyen.

C'est au pôle que l'on voit la baisse la plus nette du rayon tandis qu'il devient plus grand aux moyennes et faibles latitudes. Mentionnons qu'entre 20° et 90° de latitude, il s'agit essentiellement de passages observés le matin quand la qualité des mesures est meilleure comme nous l'avons vu et de plus, les effectifs sont les plus nombreux. Chaque point représente en moyenne 1700 écarts. La région de 100° à 160°, comprend essentiellement des observations faites à l'Ouest où le nombre moyen d'écarts mesurés pour chaque point est moindre, de l'ordre de 1100.

L'approximation des écarts observés par DORAYSOL par un polynôme de degré 8 conduit à un coefficient de corrélation élevé, de l'ordre de 0.83 qui pourrait affermir l'idée d'une liaison réelle entre le rayon et son inclinaison sur l'équateur solaire. Il convient toutefois d'émettre quelques réserves concernant ce résultat, des effets systématiques ne sont pas à exclure, les écarts au rayon moyen mesurés sur la photosphère n'étant pas observés simultanément.

Ainsi, la région voisine du pôle, entre 80° et 100° d'inclinaison héliographique correspond aux effectifs de mesures les moins nombreux. Cette région n'est jamais accessible pendant les mois d'été mais seulement à l'Est, en début de campagne jusqu'au début du mois de mai, et à l'Ouest en fin de campagne à partir de la fin du mois d'août. Ces périodes d'observations à CALERN ne comprennent alors que de grandes distances zénithales et par conséquent des mesures de moindre qualité.

4. Conclusion

Le nouvel instrument installé sur le site de CALERN a procuré en 8 ans près de 20 000 mesures du rayon solaire, soit plus de deux fois l'effectif des mesures faites avec l'Astrolabe solaire sur une trentaine d'années. Les mesures acquises par DORAYSOL au moyen de CCD sont exemptes des effets personnels qui affectent les observations visuelles. Leur qualité et leur accord avec les mesures de l'Astrolabe solaire sur la période commune d'observations contribuent à qualifier la série visuelle pour la valeur moyenne et les variations apparentes du rayon. Le rayon moyen obtenu avec l'instrument DORAYSOL est de $959,48'' \pm 0,01''$, sa variation ressemble à celle que révélait la série de l'Astrolabe solaire, à savoir une apparente opposition de phase avec l'activité magnétique.

L'instrument réalisé pour sa plus grande part sur le site de CALERN requiert encore des améliorations concernant en particulier le prisme d'angle variable. Le prisme utilisé jusqu'ici n'a pas toute la qualité métrologique qui est nécessaire pour ce type de mesure. Un nouveau prisme existant [19] et des modifications à venir conduiront à l'automatisation de l'instrument pour assurer le programme d'observations au sol dans les meilleures conditions.

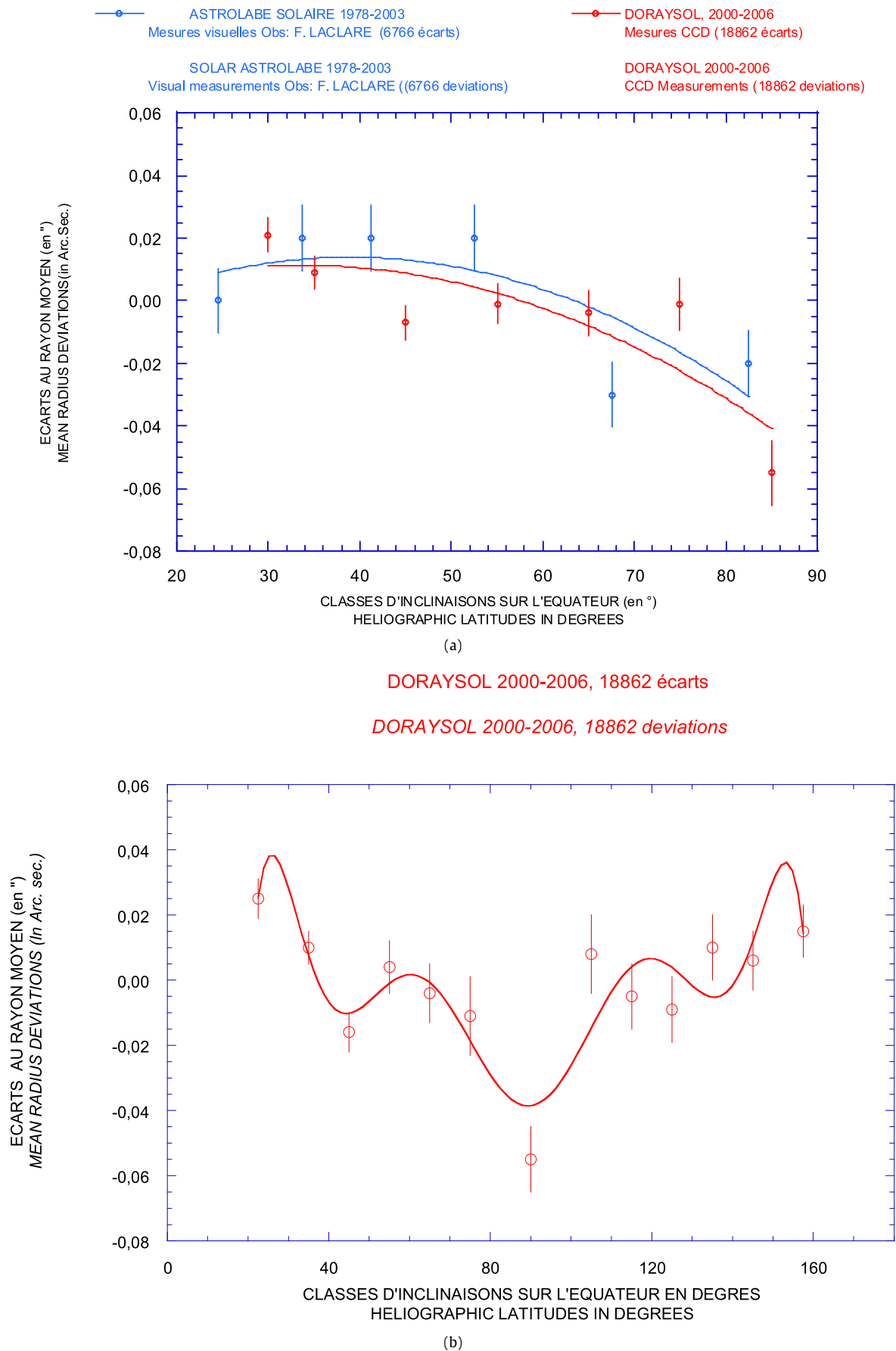


Fig. 8. (a) DORAYSOL et ASTROLABE SOLAIRE : Inclinaisons héliographiques de 20° à 90° ; (b) DORAYSOL Inclinaisons héliographiques de 20° à 160°.

Fig. 8. (a) DORAYSOL and Solar Astrolabe, from 20° to 90° heliographic latitudes; (b) DORAYSOL, from 20° to 160° heliographic latitudes.

La durée d'exploitation de DORAYSOL ne couvre pas encore un cycle complet. Elle est insuffisante à ce jour pour pouvoir détecter avec un degré de confiance satisfaisant d'éventuelles variations du demi-diamètre, comme nous avons pu le faire sur la série de l'Astrolabe solaire [14,15]. Néanmoins, la tendance observée par DORAYSOL entre 2000 et 2006 prolonge de manière satisfaisante la série de mesures visuelles du rayon et pourrait confirmer l'anti-corrélation avec l'activité magnétique.

Enfin, ces mesures montrent également certaines dissymétries apparentes de l'image photosphérique du Soleil que nous avons observées avec l'Astrolabe solaire et que par ailleurs d'autres techniques révèlent [22].

Malgré les améliorations apportées à nos instruments au sol, seules les mesures depuis l'espace répondront de manière claire aux questions concernant la géométrie du Soleil, son rayon et ses éventuelles variations, à condition que le suivi des observations couvre de longues durées, voire plusieurs cycles. Ce type de « surveillance » n'est généralement pas dévolu aux expériences spatiales dont la durée de vie est brève, de l'ordre de quelques années ; c'est donc au sol, par des mesures continues et calibrées sur les mesures spatiales que l'on doit conduire un tel programme. C'est bien dans cet esprit que nous avons commencé le programme DORAYSOL qui vient continuer la longue série de mesures faites avec l'Astrolabe solaire et qui devrait être simultanément à l'expérience du satellite PICARD. C'est également dans ce but que l'instrument MISOLFA,¹ installé sur le site au voisinage immédiat de DORAYSOL, permettra, par la mesure des paramètres de la turbulence, de qualifier les mesures faites depuis le sol. Enfin, nos mesures seront à rapprocher de celles qu'obtiendra la réplique SODISM² du satellite PICARD dont nous préparons depuis plusieurs années l'installation sur le site de CALERN avec l'aide du C.N.E.S. et du LATMOS.³

Remerciements

Jean Pierre COIN, Ingénieur à l'Observatoire de la Côte d'Azur a dirigé l'ensemble de la réalisation optique et mécanique de l'instrument DORAYSOL.

Victor SINCEAC, étudiant de l'Observatoire de Paris a développé et mis au point sur l'Astrolabe solaire l'ensemble du système d'acquisitions numériques utilisé par DORAYSOL.

G. COLAS, étudiant stagiaire en informatique à l'I.U.T. de Limoges a largement contribué au programme d'observations.

Pierre BOURGET a conçu et réalisé le nouveau prisme d'angle variable.

Références

- [1] F. Morand, E. Hunaut, Ch. Delmas, J.P. Coin, P. Bourget, Automatisation de l'instrument DORAYSOL, Compte-rendus de la deuxième réunion annuelle R2S3, 2003.
- [2] F. Laclare, Mesures du diamètre solaire à l'Astrolabe, *Astron. Astrophys.* 125 (1983) 200–203.
- [3] F. Laclare, Ch. Delmas, J.P. Coin, A. Irbah, Measurements and variations of the solar diameter, *Solar Phys.* 166 (1996) 211–229.
- [4] F. Laclare, G. Merlin, L'Astrolabe solaire impersonnalisé par l'emploi d'une camera CCD. Application à la mesure du diamètre solaire, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. II* 313 (1991) 323–330.
- [5] V. Sinceac, Thèse de doctorat, 1998, Observatoire de PARIS.
- [6] F. Chollet, V. Sinceac, Analysis of solar radius determinations obtained by the modern CCD Astrolabe of the CALERN observatory, a new approach of the solar limb definition, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 139 (2) (1999) 219–229.
- [7] D. Djafer, G. Thuillier, S. Sofia, A. Egidi, Processing methods effects on solar diameter measurements: Use of data gathered by the solar disk sextant, *Solar Phys.* 247 (2008) 225–248.
- [8] D.L. Fried, Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures, *J. Opt. Soc. Am.* 56 (1966) 1372–1379.
- [9] A. Irbah, F. Laclare, J. Borgnino, G. Merlin, Solar diameter measurements with CALERN Observatory Astrolabe and atmospheric turbulence, *Solar Phys.* 149 (1994) 213–230.
- [10] L. Lakhali, A. Irbah, M. Bouzaria, J. Borgnino, F. Laclare, Ch. Delmas, Error due to atmospheric turbulence effects on solar diameter measurements performed with an Astrolabe, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 138 (1999) 155–162.
- [11] D. Djafer, G. Thuillier, S. Sofia, A comparison among solar diameter measurements carried out from the ground and outside Earth's atmosphere, *Astrophys. J.* 676 (2008) 651–657.
- [12] G. Thuillier, S. Sofia, M. Herberreiter, Past, Present and future measurements of the solar diameter, *Adv. Space Res.* 35 (2005) 329–340.
- [13] A. Egidi, B. Caccin, S. Sofia, W. Heaps, W. Hoegy, L. Twigg, High-precision measurements of the solar diameter and oblateness by the solar disk sextant (SDS) experiment, *Solar Phys.* 235 (2006) 407–408.
- [14] Ph. Delache, F. Laclare, H. Sadsaoud, Long period oscillations in solar diameter measurements, *Nature* 317 (1985) 416–418.
- [15] F. Laclare, Ch. Delmas, A. Irbah, Variations apparentes du rayon solaire observées à l'Observatoire de la Côte d'Azur (Astrolabe solaire du site de CALERN : 1975–1978), *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. II b* 327 (1999) 1107–1114.
- [16] M. Emilio, J.R. Kuhn, R.I. Bush, P. Sherrer, On the constancy of the solar diameter, *Astrophys. J.* 543 (2000) 1007.
- [17] M. Emilio, Estudo das variações do semi diâmetro solar, Master of sciences thesis, IAG/Universidade de Sao Paulo, 1997.
- [18] F. Noël, On solar radius variations observed with Astrolabe, *Solar Phys.* 232 (2005) 127–141.
- [19] Ch. Delmas, F. Morand, F. Laclare, A. Irbah, G. Thuillier, P. Bourget, Ground solar radius survey in view of micro satellite missions, *Adv. Space Res.* 3 (2006) 1564–1568.
- [20] Ch. Delmas, F. Laclare, Short VS Long time series: Example of the solar diameter, *Solar Phys.* 209 (2002) 391–396.
- [21] A.H. Andrei, S.C. Boscardin, F. Chollet, C. Delmas, O. Golbasi, E.G. Jilinski, H. Kilic, F. Laclare, F. Morand, J.L. Penna, E. Reis Neto, Comparison of CCD astrolabe multi-site solar diameter observations, *A&A* 427 (2004) 717–723.
- [22] S. Lefebvre, L. Bertello, R.K. Ulrich, J.E. Boyden, J.P. Rozelot, Solar radius measurements at Mount Wilson Observatory, *Astrophys. J.* 649 (2006) 444–451.

¹ MISOLFA : Moniteur d'Image solaire Franco-Algérien.

² SODISM 2 : Réplique du télescope embarqué SODISM : Solar Diameter Imager and Surface Mapper.

³ LATMOS : Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales.