

LA MÉTROLOGIE DES ANTENNES DE RADIOASTRONOMIE MILLIMÉTRIQUE

D. ROUX

IRAM - Institut de Radio-Astronomie Millimétrique

PRÉSENTATION :

Je tiens à remercier Monsieur GERVAISE de m'avoir demandé d'exposer brièvement la nature du projet Pic de Bure de l'Iram* (Institut de Radio Astronomie Millimétrique) au moment même où cet institut naissait d'une coopération Franco-Hispano-Allemande. J'ai constaté dans les diverses réunions auxquelles j'ai déjà participé la qualité des résultats métrologiques de nos aînés, et nous espérons faire encore mieux avec leur appui. J'entends par là leur aide dans divers domaines : informations, développement instrumental, et techniques de mesure.

Comme je l'exprimais dans le résumé qui vous a été remis, c'est à la fois facile et difficile de parler d'un projet plutôt que d'une réalisation.

C'est en effet facile d'aligner des bilans d'erreur prometteurs où les microns s'ajoutent les uns aux autres sans jamais franchir le seuil de la centaine ; et c'est en effet difficile de tenir les promesses d'un projet jusqu'à sa réalisation.

Les chiffres qu'annonce aujourd'hui cet exposé sont souvent à la limite du réalisable ; nous espérons les concrétiser par les mesures que nous effectuerons en 1982 sur le pic de Bure sur notre première antenne, telle est notre intime conviction.

INTRODUCTION

Avant d'aborder les problèmes de mesure des radiotélescopes proprement dits je voudrais mentionner quelques généralités sur la radioastronomie qui permettront de comprendre pourquoi un tel degré de précision est requis et pourquoi aucune autre solution ne peut être envisagée.

Que sont les radiotélescopes ? Je dirai que ce sont les télescopes de l'invisible : ils recueillent sur des miroirs métalliques des ondes radio-électriques de longueur d'onde allant de 20 mètres au confins du millimétrique. Ces ondes sont émises par des radio-sources appartenant à notre galaxie, ou des radio-sources extra-galactiques. Les radio-sources sont parfois des restes de novae ou supernovae, très généralement des gaz, neutres ou ionisés, émetteurs radio du fait de diverses situations physiques auxquelles intensités et spectres permettent de remonter.

Rappel de la formule définissant la longueur d'onde en fonction de la vitesse de la lumière et de la fréquence :

$$c = \lambda f$$

c = vitesse lumière 299792,5 km/sec.

les unités compatibles sont :

λ : mètre

c : m/s

f : hertz.

Ces instruments ont une activité essentiellement orientée vers la recherche fondamentale. Ils permettent d'étudier le rayonnement de l'univers et peut-être de vérifier telle ou telle théorie sur la création de l'univers, sur son explosion centrale originelle, sur la formation des étoiles par exemple.

Plus particulièrement les instruments qui nous occupent ici sont destinés à opérer dans les zones :

centimétrique 3 = 30 GHz

millimétrique 30 = 300 GHz

Actuellement un certain nombre de molécules ont été identifiées dans le domaine du millimétrique, la plupart avec plusieurs raies moléculaires ce qui permet de déduire de précieux renseignements sur la température, la densité des "nuages" moléculaires, par exemple. C'est un domaine nouveau où les découvertes fréquentes stimulent les chercheurs : les raies bien distinctes de quelques molécules formées d'isotopes, disons de ¹³CO comparées à celles de ¹²CO, nous apportent une moisson d'informations lorsque la physique de leur émission est bien comprise, par exemple.

FACTEURS DE PROGRESSION DU MILLIMÉTRIQUE

Deux facteurs principaux permettent d'atteindre les confins du millimétrique, ce sont : d'une part, la qualité des récepteurs et d'autre part, la qualité de la surface réceptrice liée à sa dimension.

1. Les récepteurs

Ces récepteurs ont fait l'objet de progrès considérables ces dernières années et sans entrer dans des détails hors de ma compétence, on peut citer trois chiffres donnant une idée de l'importance de l'instrument :

- le premier sera budgétaire : le récepteur et le système de gestion qui l'entoure représentent la moitié du coût d'un radiotélescope ; les deux autres chiffres seront techniques.

— le deuxième concerne les progrès réalisés sur la température de bruit ou bruit de fond. Sans remonter au début de la radioastronomie, en 1972 pour une longueur d'onde de 3 mm, le bruit de fond des récepteurs était compris entre 1200 et 1500°K ; en 1980 pour cette même longueur d'onde il est de 200°K. (à titre indicatif en 1980 pour 2 mm on peut réaliser 400°K de bruit de fond, et pour 1 mm 1500°K). Cette température de bruit mesure une énergie, celle qu'ajoute au signal collecté — l'entachant de ses fluctuations — le système récepteur.

— le troisième concerne la température de refroidissement du récepteur, contribuant à la diminution du bruit de fond.

Actuellement sans avoir des installations trop "usinesques, l'on peut refroidir un récepteur entre 15° et 20°K ; il serait possible d'atteindre 4°K mais avec des difficultés sans rapport avec le gain espéré.

2. La surface réceptrice

On peut schématiser le problème de la surface en disant que le rendement en flux de l'antenne est fonction de sa surface collectrice et que l'étude des courtes longueurs d'ondes est liée à la définition de surface (écart moyen quadratique e.m.q. ou "root mean square" r.m.s.)

La formule de Ruze définit le critère de qualité de surface de l'antenne ou plus précisément le facteur de dégradation de la surface par rapport à une antenne idéale ; elle est la suivante :

$$k = e^{-(4\pi/\lambda)^2 \sigma^2}$$

D'après cette formule l'on voit que le rendement est maximum soit pour λ infini, soit pour $\sigma = 0$.

Considérant qu'une antenne est intéressante pour un rendement en surface supérieur ou égal à 50 %, de son rendement optimum, nous voyons que pour étudier valablement dans la zone du millimétrique il nous faut :

T = 100'' m r.m.s. pour jusqu'à 1,5 mm

T = 50'' m r.m.s. pour jusqu'à 0,8 mm

T = 25'' m r.m.s. pour jusqu'à 0,5 mm

Pour simplifier nous prendrons = ce qui

16 nous

donne un rendement Standard de 0,54.

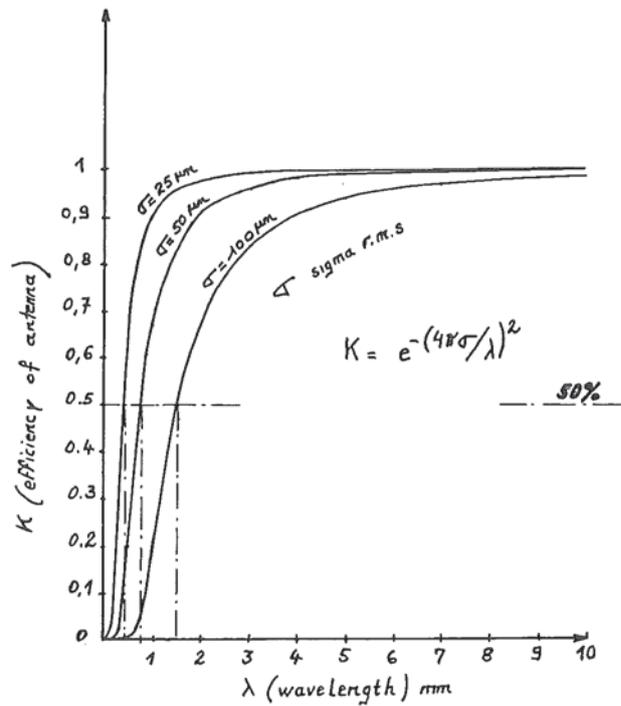


fig. 1 - Courbe de rendement fonction de σ et λ .

3. Facteurs extérieurs

L'étude des ondes millimétriques et sub-millimétriques nous met en présence d'une troisième contrainte : les fenêtres radio astronomiques elles-mêmes liées à deux éléments de notre atmosphère, l'oxygène et la vapeur d'eau qui constituent des écrans naturels aux observations à certaines longueurs d'onde.

S'il est difficile de nous soustraire aux effets de l'oxygène (l'échelle de hauteur en air sec est de 7 km), sans avoir recours à des expériences spatiales (dont les coûts sont tout autres que le budget IRAM), il n'en est pas de même pour la vapeur d'eau où l'altitude critique est de 2 km. D'où le choix d'un site de montagne.

Nous pouvons voir ici les fenêtres radio-astronomiques et l'influence de l'altitude sur le rendement des antennes. Actuellement les fenêtres les plus couramment utilisées sont la 1^{ère} et 2^e, et l'utilisation des fenêtres n° 3, 4 et 5 dépend essentiellement de la qualité de surface de l'antenne (γ).

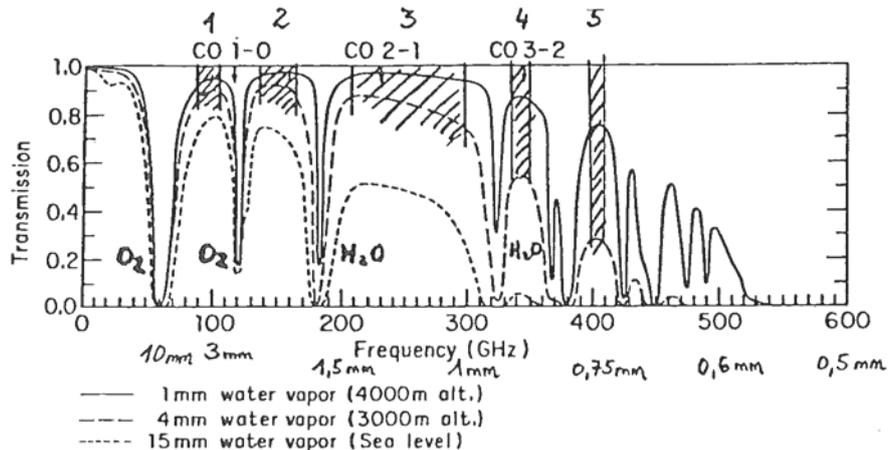


fig. 2 - Courbes de transmission atmosphérique définissant les fenêtres radio-astronomiques.

LES GRANDS PROJETS ACTUELS

Je vais maintenant très rapidement situer le projet IRAM par rapport aux projets mondiaux actuels. Il existe 4 projets de grands radio-télescopes de la génération millimétrique.

1. Le projet Japonais est assez similaire au projet I R A M .
Il se compose à la fois d'un outil à grande surface de 45 mètres de diamètre, et d'un interféromètre à grande résolution, avec 4 antennes de 10 mètres de diamètre. Le site, en raison du manque de surface de ce pays est médiocre : il est situé à 1300 m d'altitude. Les spécifications de surface (200 à 250 m r.m.s.) devraient permettre de travailler dans la 2^e fenêtre vers 90 GHz. Le projet est prévu pour 1982 si nos collègues clarifient les problèmes actuels de tous les centres de recherche, à savoir les finances et le personnel. (latitude 36° N).
2. Le projet Anglais (S.R.C.) est un projet sub-millimétrique avec sa spécification de 25 à 50 m r.m.s. (3^e, 4^e, 5^e fenêtres). Il s'agit d'une antenne de 15 mètres installée aux Iles Canaries à 2100 m : très bon site en raison de l'altitude et de la latitude (plus au sud). Ce projet a été accepté et devrait être financé incessamment.
3. Le projet Américain de 25 m de diamètre et 50 m de précision, avec astrodôme (absence de vent d'où structure plus légère mais un astrodôme = coût : 60 % d'une antenne). Le site prévu est celui d'Hawaii au Mauna Kea où de nombreux équipements d'astronomie sont installés (3,60 m optique et 3,80 m infra-rouge). Ce projet a été rejeté en 1980 par le président américain, mais devrait être approuvé ultérieurement ; les études continuent actuellement et les Américains sont confiants car ils espèrent le construire dans des délais très courts.
4. Le projet IRAM (Franco-Allemand à participation Espagnole) : il s'agit d'une part d'une grande antenne de 30 m qui se situera en Espagne, au Pico Veleta à 2800 m d'altitude ; précision spécifiée : r.m.s. 100 , et d'un interféromètre de 3 an-

tennes de 15 m, précision spécifiée : 50 r.m.s., qui se situera au Pic de Bure près de Gap à 2550 m d'altitude (la latitude du site Espagnol est plus favorable car plus méridionale, donc avec plus de ciel visible).

Ces deux instruments ont une complémentarité. L'un peut-être défini comme étant doté d'une grande sensibilité en puissance reçue (surface importante) on peut ainsi cartographier un objet de faible flux d'une façon rapide et immédiate.

L'autre (interféromètre) est doté d'un grand pouvoir de résolution angulaire du fait de sa base interférométrique. (sans entrer dans les détails il permet d'avoir la résolution d'une antenne ayant le diamètre de la base maximum permise (1700 m dans l'avenir), mais son exploitation est lente. Elle nécessite des déplacements d'antennes, plusieurs semaines d'observations pour un objet donné et interprétation différée sur ordinateur (fig. 3).

LE CONTRÔLE DE LA SURFACE

Les phases de mesure d'une antenne millimétrique de grande dimension (actuellement la décision pour notre projet a été prise pour 15 mètres de diamètre) peuvent se décomposer de la façon suivante :

1. La mesure industrielle des panneaux réflecteurs.
Après de nombreuses études sur le choix des matériaux, sur les techniques d'usinage, de fabrication, la solution qui semble avoir le plus de chances d'aboutir serait un pré-découpage de l'antenne en secteur (16 ou 24) eux-mêmes formés de panneaux d'environ 2 à 3 m² qui seraient composés d'un ensemble de panneaux mini-facettes emboutis. La précision de 25 m est assurée par des machines à mesurer tri-dimensionnelles. La prospection industrielle de telles machines nous a conduit à adopter des panneaux de 2 à 3 m² qui seraient pré-réglés avant montage mécanique sur le secteur, et réglés définitivement sur le Pic de Bure.
La surface d'une antenne étant voisine de 200 m², il convient d'envisager 600 points de supports réglables (3 par m² environ) sur la structure. (fig. 4).

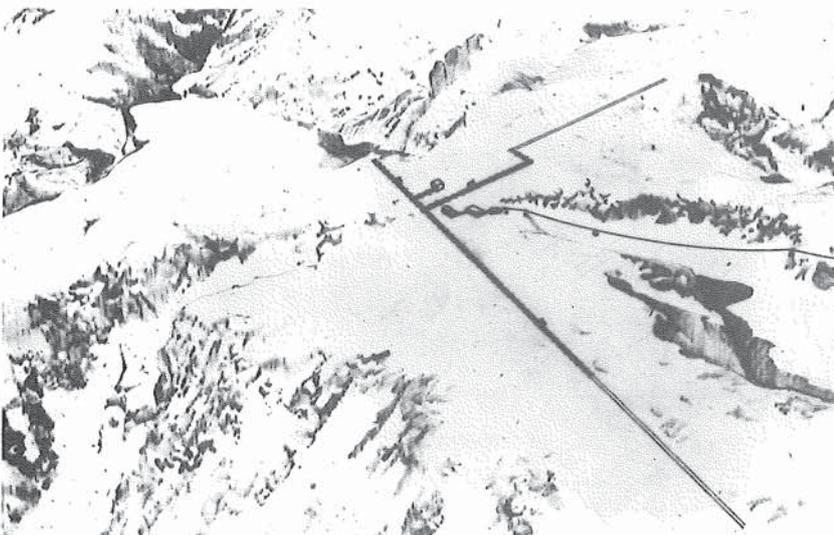


fig. 3 - Schéma d'architecte de l'interféromètre à 3 antennes.

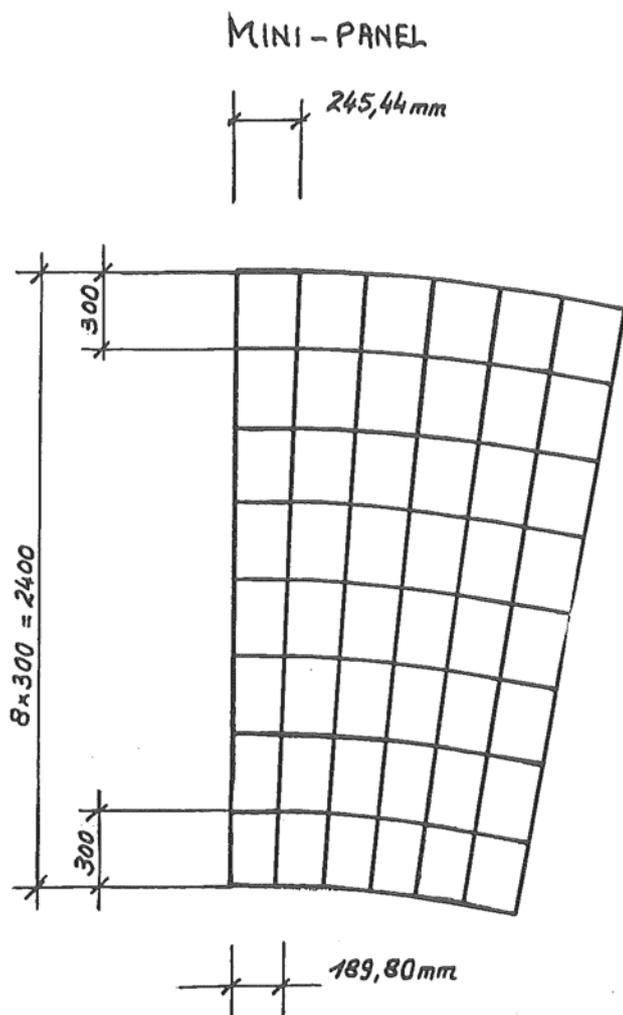


fig. 4 - Schéma d'un panneau possible.

2. La mesure du réflecteur dans sa position de visée du zénith (au montage).

La mesure du réflecteur devrait se faire dans sa position d'utilisation afin de connaître sa forme géométrique réelle en fonction des déformations résiduelles dues à la gravité et aux effets thermiques. Le seul procédé envisageable pour un tel contrôle de surface dans les techniques habituellement employées serait le procédé photogrammétrique, mais ses limites en précision bien connues ont orienté notre étude sur des procédés de contrôles métrologiques industriels.

En vertu du principe de l'homologie appliqué lors de la conception de la structure de l'antenne, on peut envisager une mesure de l'antenne dans une position donnée. (la plus favorable étant la position horizontale, face au zénith), à une température donnée contrôlée (hall thermostaté). Les variations résiduelles pour une position quelconque seront ensuite données par le calcul, dans un premier temps. En effet, une variation homothétique du paraboloïde entraîne un simple changement de focale, ce qui conduit à ajuster le récepteur à ce nouveau foyer pour obtenir la meilleure mise au point.

Par contre, les diverses erreurs résiduelles par rapport à cette figure homothétique doivent toutes se situer à l'intérieur des tolérances spécifiées pour chacun des effets envisagés. Actuellement les divers buts à atteindre sont les suivants :

- gravité sous inclinaison variable : $25 \mu\text{m}$;
 - dilatation en température : $25 \mu\text{m}$;
 - déformations dues au vent (30-40 km/h) : $25 \mu\text{m}$;
 - imprécision d'ajustage et de contrôle : $25 \mu\text{m}$;
- soit, $50 \mu\text{m}$ r.s.s. (root sum square) en combinant quadratiquement les erreurs.

2.1. Instrumentation

Une telle précision ne peut, au niveau du contrôle de surface, se réaliser qu'au moyen d'une mesure laser. Les distances seront mesurées par interférométrie laser (type H.P.) et les alignements par laser Hélium-Néon (type Spectra-Physics), associé à des systèmes quadri-cellules :

Mesure de distances	Hewlett Packard	Soro
Précision	10'	10'
Résolution	$0,16 \mu\text{m}$	$0,30 \mu\text{m}$
$= \lambda =$	$0,628 \mu\text{m}$	$0,632 \mu\text{m}$
Performance	60 m	30 m

Mesure d'alignement :

- Spectra physics associé avec quadri cellules (asservissement chariot).
- Laser alignement SOPELEM associé avec 3 systèmes de quadri cellules ; il permet de mesurer constamment les défauts d'alignement par rapport à un alignement "reset".
- Système Laser H.P. associé à un prisme de Wollaston : mesure du défaut d'alignement par procédé télémétrique.

Les deux dernières solutions s'affranchissent de l'instabilité du faisceau laser.

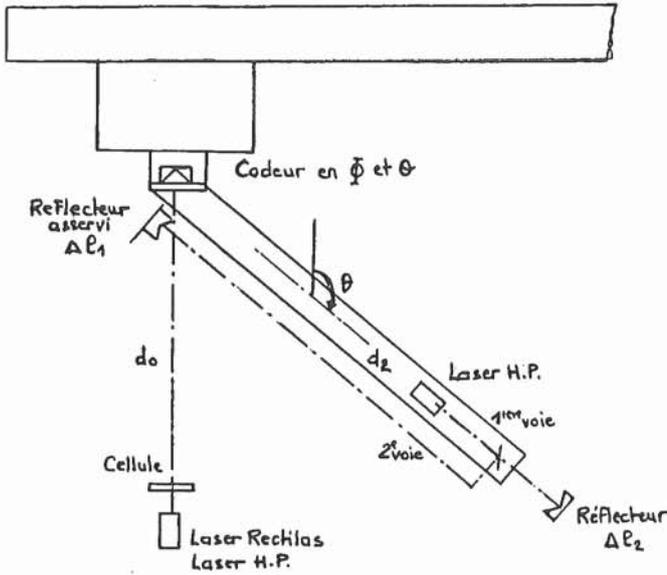
2.2. Méthodes

Le degré de précision requis nous conduit à adopter une instrumentation essentiellement basée sur des mesures de longueurs tout au moins en ce qui concerne les paramètres fondamentaux. En effet, la mesure de l'angle φ (φ étant l'angle azimuthal d'un point par rapport à un méridien origine), sert essentiellement à déterminer la cartographie des points mesurés en vue de calculer l'écart quadratique de la précision de surface d'un panneau, afin d'en assurer le réglage ultérieur.

En conséquence, je vous présenterai deux types de machine à mesurer ayant retenu notre attention en vue d'une étude plus détaillée dans le proche avenir.

- IRAM centre de courbure
- IRAM coordonnées cartésiennes

Centre de Courbure (variante)

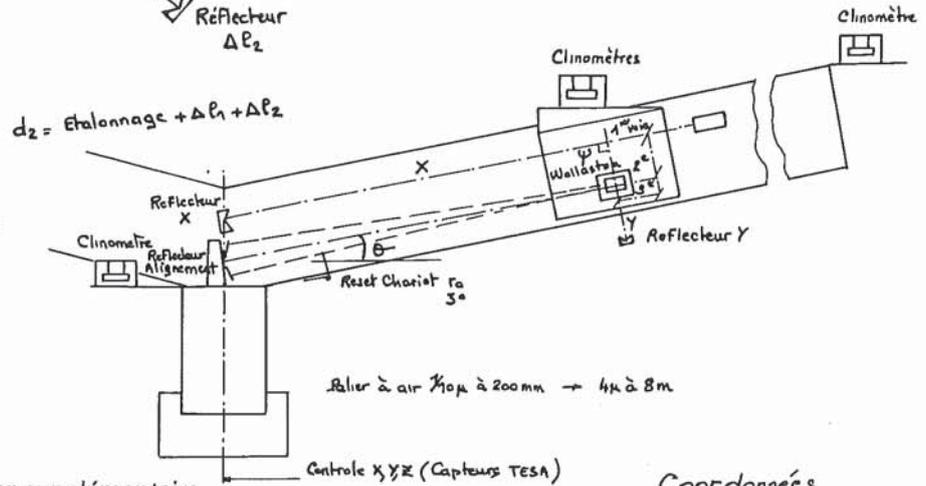


1. Comparaisons techniques

(IRAM) — Centre de Courbure — (fig. 5 et 6)

- Base de référence
Système de mesures indirectes. Étalonnage du mât.
- Longueur de la sonde : 0,10 m
Hauteur balayée par faisceaux lasers $\alpha < h < 12$ m
Gradient thermique important
Automatisation en \mathcal{C} (système suspendu)
- 1 asservissement sonde
Un mini ordinateur (style HP 45)
Matériel peu standard
- Principe de mesure :
1 mesure critique le long du bras, proche de la physique : mesure quasi-normale à la surface (voir bilan d'erreur aléatoire).
- Démontage quadrupode pas obligatoire si la mesure d_0 est obtenue d'une autre façon par le bras d_2 .

fig. 5 et 6 - Dispositif de mesure IRAM par le centre de courbure.



Points critiques :

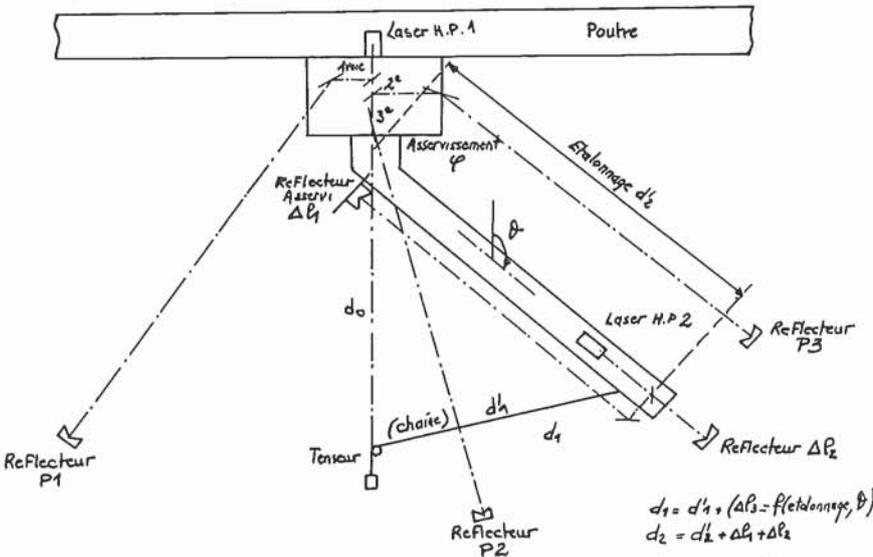
- Stabilité du point haut, 1 laser supplémentaire.
- Asservissement du système bras-compas d'apparence complexe.
- Asservissement contrôle de déformation fine : mouvements du bras entraînant un fléchissement variable (système CERN non commercialisé).
- Un système lecture (chaîne tenseur) à créer (sortie digitale).

— Mécanique lourde.

Coordonnées
Cartésiennes

(IRAM) — Coordonnées cartésiennes —
(dérivée SRC) fig. 7 et 8

Surface de référence.
Mesures directes.



Centre de Courbure

fig. 7 et 8 - Dispositif de mesure IRAM par coordonnées cartésiennes.

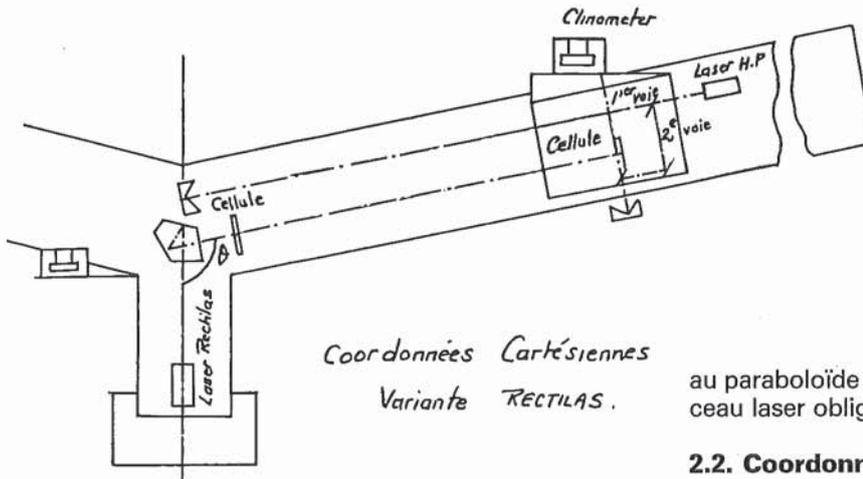


fig. 8

Longueur de la sonde 0,70 m
 Hauteur balayée par faisceaux lasers $0 < h < 3$ m 21°
 • Gradient thermique faible.
 Automatisation en τ (l'axe de rotation de la machine paraît simple à définir).
 2 asservissements sonde (y, chariot x)
 1 mini ordinateur (style HP 45)
 • Matériel (contrôle déplacement TESA éventuellement, standard HP, clinomètre standard CERN).
 Principe de mesure : Table en x, y. Mesure critique y.
 Tolérance plus importante sur x (voir bilan erreur).
 Démontage du quadrupode obligatoire.

Points critiques :

Stabilité et reproductibilité poutre (système palier à air + contrôle par clinomètre standard CERN).
 Création d'un chariot supportant l'ensemble du matériel de mesure 3 voies x, y, Wollaston)

2. Bilan des erreurs systématiques et aléatoires

Ce bilan d'erreur est établi par une tolérance de 25μ sur l'écart au paraboloïde théorique en chaque point.

2.1. Centre de courbure

2.1.1. Erreurs systématiques

- Une erreur systématique sur d_1 inférieure à 381μ (voir erreur accidentelle 2.1.1.), ce qui est toujours le cas avec un ruban étalonné, a un effet du 2^e ordre (paraboloïde homothétique) à celui causé par une erreur accidentelle de même valeur.
- Une erreur systématique $\Sigma = 0,565$ mm sur d_2 et d_0 (erreur d'étalonnage du bras par ex.) entraîne un écart au paraboloïde homothétique de distance focale ($f + \Sigma / 2$) allant de 0 à 25μ m.

2.1.2 Erreurs aléatoires ou accidentelles

- une erreur sur d_1 entraîne un écart au paraboloïde de 25μ de la façon suivante :

0m	1m	6m	7,5m
"	1245 μ m	1432 μ	381 μ m

au 1er ordre au 1er ordre

On s'aperçoit que seule la zone des 7 mètres est influencée et encore très modestement.

- une erreur sur la variation de d_2 entraîne un écart au paraboloïde de 25μ m pour une erreur de 25μ m constante puisque la mesure est normale

au paraboloïde de 0 à 7,5 mètres (mesure par faisceau laser obligatoire).

2.2. Coordonnées cartésiennes

2.2.1 Erreurs systématiques (calcul avec 22 grades)

- une erreur systématique en z_0 est sans influence sur le paraboloïde obtenu puisque l'on obtient un paraboloïde translaté de l'erreur Δz_0 sur z_0 .
- une erreur systématique de r_0 (erreur Σ) donne une courbe dont l'écart à la parabole théorique est de 25μ m.

$\Sigma 363$ m	170 μ m	675 μ m
$\Phi 1$ m	4-5m	7m

Le point le plus critique situé entre 4 et 5 mètres, tolère une imprecision sur la connaissance du r_0 de 0,17 mm.

2.2.2 Erreurs aléatoires ou accidentelles

Des erreurs sur x et sur y permises pour un écart maximal de 25μ m tout point du paraboloïde sont les suivants :

dx	80 μ m	107 μ m	100 μ m
			1 ^{er} ordre
	1m	4-5m	7,5m
dy	26 m	25 m	26 μ m

La mesure quasi normale de y nous met dans un cas similaire à la mesure de d_2 . La précision est obtenue dans les deux cas par une mesure laser ce qui est relativement luxueux pour la mesure de x.

Il est clair que dans les deux bilans il faudrait établir une combinaison quadratique des quatre erreurs totales, et c'est elle qui devrait être inférieure à 25μ m. Ce qui réduit d'environ un facteur deux les chiffres tolérés précités.

Cette étude a été faite pour la totalité des points à 25μ m ; mais on peut réduire considérablement ces contraintes si l'on a affaire à la précision r.m.s. de 25μ m, et encore davantage si l'on recherche le paraboloïde des moindres carrés au lieu du paraboloïde homothétique dans le calcul de tolérance aux erreurs systématiques.

CONCLUSION

Cette pré-étude a pour but de susciter un certain nombre de critiques et de suggestions au sein de notre institut et à l'extérieur, une étude de faisabilité et de coût est en cours afin de sélectionner une méthode et de définir un objectif industriel précis en décembre 1980. Nous espérons pouvoir présenter dès 1981 une étude de détail et peut-être des résultats expérimentaux en fin d'année 1982. ■