

Lumière et métrologie

P. Bouchareine

*Institut d'Optique Théorique et Appliquée, URA 14 du CNRS, Université de Paris Sud,
B.P. 147, 91403 Orsay cedex, France*

Résumé : le rôle de la lumière en métrologie est souligné tant dans ses aspects fondamentaux (définition du mètre rattaché à la définition de la seconde par la vitesse de la lumière dans le vide) que par l'instrumentation optique traditionnelle (goniomètre, lunette autocollimatrice) ou par des développements industriels récents (lasers et interférométrie, règles et cercles optiques). De même que l'électronique a été le nerf de l'instrumentation de mesure dans la première moitié du vingtième siècle, de même l'optique se révèle un outil alliant légèreté, rapidité et précision dans de nombreux domaines de la mesure scientifique et industrielle.

Il n'est point de métrologie sans lumière, cela va sans dire. Mais, plus que cela, la lumière tient une place primordiale en métrologie, tant sur le plan fondamental que dans les applications pratiques.

1. LA VITESSE DE LA LUMIÈRE DANS LE VIDE ET LA DÉFINITION DU MÈTRE

La vitesse de la lumière dans le vide est sans doute une des constantes les plus fondamentales de la physique, puisqu'elle ne dépend d'aucun système matériel, si ce n'est d'une horloge qui définit la seconde. C'est une propriété du vide qui ne met en jeu aucun dispositif expérimental particulier. Elle a été choisie en octobre 1983 par la XVII^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures pour rattacher l'unité de longueur, le mètre, à l'unité de temps, la seconde. La définition qui fut promulguée alors est la conséquence naturelle de travaux qui remontent à la fin du siècle dernier : la mesure du mètre en longueurs d'onde de la radiation rouge du cadmium, d'abord par Albert Michelson au Bureau International des Poids et Mesures en 1894, puis par Charles Fabry au Conservatoire des Arts et Métiers en 1907. Ce fut d'abord l'angström (Å) qui permit aux spectroscopistes de profiter de toute la précision permise par les mesures interférentielles, sans avoir à passer par la règle en platine, puis la définition du mètre de 1960 basée sur la longueur d'onde dans le vide de la radiation orangée du krypton 86, définition qui fut certainement mieux rattachée aux mesures de Michelson et de Fabry qu'à l'étalon encore en vigueur en 1960 : le Prototype International en platine iridié. Enfin la

définition actuelle résulte des travaux expérimentaux menés en Europe et aux Etats-Unis d'Amérique sur les lasers stabilisés en fréquence :

Le mètre est la distance parcourue par la lumière dans le vide en une durée de $1/299\,792\,458$ seconde.

Cette définition attribue une valeur exacte et conventionnelle à la vitesse de la lumière dans le vide, donnant une nouvelle nature à la métrique de l'espace. Certains se sont inquiétés de ce que la théorie de la relativité prévoyait, et l'expérience vérifiait, un ralentissement des ondes électromagnétiques en présence d'un champ de gravitation. Mais la valeur constante attribuée à la vitesse de la lumière n'est pas incompatible avec de tels faits, c'est une courbure de l'espace-temps qui se manifeste ainsi.

On trouvera dans le tableau I un résumé historique des déterminations successives de cette constante fondamentale, maintenant fixée exactement par convention.

Tableau I

Les déterminations successives de la vitesse de la lumière et leur incertitude

1638	Galilée	Lanternes tenues à bras	> 1000 km/s
1675	O. Roemer	Satellites de Jupiter	214300 km/s
1728	Bradley	Aberration stellaire	295000 ± 5000 km/s
1849	H. Fizeau	Roue dentée	314900 km/s
1862	Foucault	Miroir tournant	298000 km/s
1879	A. Michelson	Miroir tournant	299910 ± 50 km/s
1926	A. Michelson	Miroir tournant	299798 km/s
1937	Anderson	Cellule de Kerr	299786 ± 15 km/s
1947	L. Essen	Cavité résonnante	$299792 \pm 4,5$ km/s
1951	Bergstrand	Cellule de Kerr	$299793,1 \pm 0,3$ km/s
1952	K.D. Froome	Interférométrie hyperfr.	$299792,6 \pm 0,7$ km/s
1958	K.D. Froome	Interférométrie hyperfr..	$299792,5 \pm 0,1$ km/s
1970	J. Hall & al.	Laser stabilisé	$299792458 \pm 1,2$ m/s
1983	C.G.P.M.	Convention	299792458,000... m/s

2. LA MESURE DES TRÈS GRANDES DISTANCES

L'application la plus directe de cette définition du mètre est la mesure des distances par temps de vol qui s'applique efficacement aux très grandes distances. La mesure la plus performante est celle de la distance de la Terre à la Lune, ou de la distance des satellites géodésiques, qui se font dans le vide. Des temps de vol de l'ordre de la seconde sont mesurés à quelques dizaines de picosecondes près ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). La distance de la Terre à la Lune à un instant donné est ainsi connue avec une incertitude de quelques centimètres, voire de quelques millimètres. Cette incertitude relative de quelques 10^{-11} en fait la meilleure mesure de longueur actuellement existante. Les satellites géodésiques permettent de suivre la dérive des continents au centimètre près, ce qui nous laisse encore dans les incertitudes relatives de l'ordre de quelques 10^{-10} .

3. L'INDICE DE L'AIR

Pour les mesures terrestres, les fluctuations de l'indice de l'air réduisent inexorablement l'exactitude, et les incertitudes passent au niveau des 10^{-7} à 10^{-6} . Pour les trajets plus courts

que quelques kilomètres, la constante de temps des détecteurs laisse une incertitude de l'ordre du millimètre, et les distances plus courtes doivent être mesurées par des artifices tels que la mesure du déphasage sur une modulation de faisceau. Les interférences lumineuses, qui donnent accès à des mesures au millième de période, permettent ainsi d'atteindre des résolutions sub-nanométriques, ce qui correspond à des limites de résolution sur le temps de propagation des ondes électromagnétiques de l'ordre de 10^{-18} s.

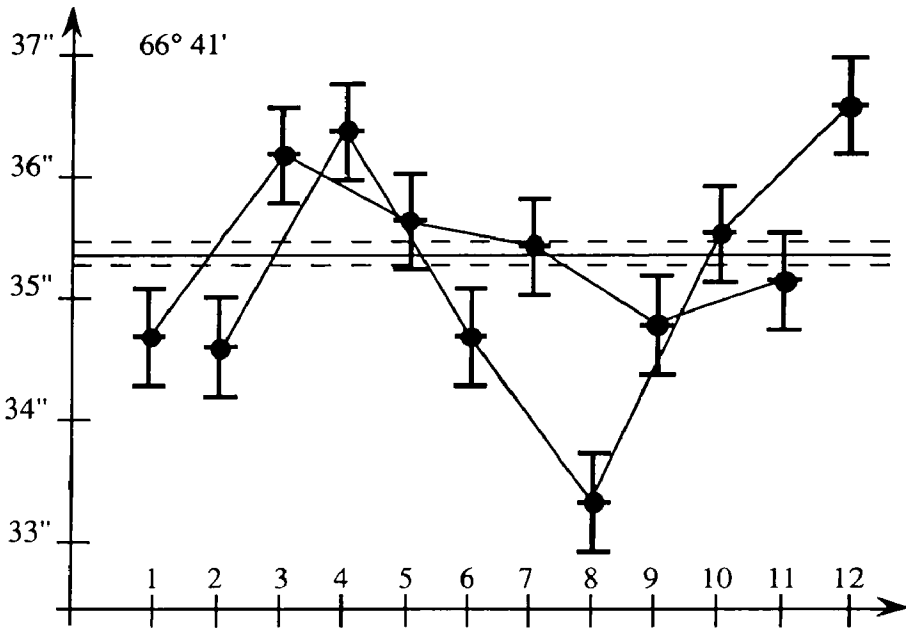


Figure 1 : Auto-étalonnage d'un cercle divisé par multiplication des mesures sur différentes portions du cercle et fermeture sur 360° . La valeur moyenne de l'erreur de gravure d'un cercle complet est par définition nulle. L'expérience montre qu'avec 12 mesures convenablement distribuées sur le cercle, cette erreur est 10 à 100 fois plus faible que les erreurs de lecture individuelles.

4. LA PROPAGATION RECTILIGNE

Mais le rôle joué par la lumière en métrologie géométrique a commencé bien avant la définition du mètre de 1983. Ce sont les avantages de la propagation rectiligne qui ont été exploités tout d'abord avec les mesures angulaires et des instruments qui sont restés longtemps des symboles de la mesure de précision, l'alidade, le sextant, le goniomètre et leurs cercles divisés. La mesure des temps a longtemps été faite sur des observations astronomiques et consistait en des pointés angulaires optiques sur les étoiles. La première définition du mètre s'appuie sur des observations terrestres et astronomiques permettant de faire, grâce à la trigonométrie, le lien entre la Toise, une règle d'environ 2,7 m, et la longueur du méridien terrestre. Bien des

techniques modernes de mesures de longueur s'appuient encore sur la triangulation, qui consiste à déduire la mesure de distances dans l'espace tridimensionnel à partir des mesures d'angles faites depuis des stations dont la distance est connue. C'est ainsi que l'Institut géographique national établit les cartes topographiques à partir de vues aériennes, les relevés des façades de monuments historiques à partir de couples de photographies ou stéréogrammes, ou assure la surveillance des ouvrages d'art tels que les ponts et les barrages. La précision de pointé angulaire d'une lunette optique est d'autant meilleure que son diamètre est plus grand. Un objectif de 50 mm de diamètre, s'il est correctement éclairé, c'est-à-dire de manière homogène sur toute sa surface, et bien protégé des perturbations atmosphériques, permet de faire des pointés avec une incertitude inférieure à une fraction de seconde d'angle ($1'' = 4,85 \cdot 10^{-6}$ rad). Pour des diamètres plus petits, l'incertitude varie à peu près comme l'inverse du diamètre. Pour des diamètres plus grands, ce sont les turbulences atmosphériques qui deviennent la limitation prépondérante.

L'étalonnage des goniomètres se fait par des méthodes très diverses. La seule répétition de la même mesure en plusieurs portions d'un cercle divisé permet d'éliminer la majeure partie des erreurs de gravure. En effet la fermeture du cercle qui donne sans erreur la valeur 360° permet d'affirmer que la majeure partie des erreurs de gravure se trouve annulée dans la moyenne faite tout autour du cercle. L'expérience montre qu'il suffit de douze mesures équidistantes pour obtenir pratiquement une très bonne annulation de ces erreurs (fig. 1)

Une autre méthode d'étalonnage des goniomètres consiste à utiliser des pièces d'optique de précision, prismes à 4, 5, 7, 12 ou 36 faces qui, accompagnés de leur cale adaptée, peuvent être étalonnés sans autre référence par interférométrie entre les faces du prisme et les faces de la cale. C'est encore une relation géométrique de fermeture sur la somme des angles d'un polygone qui permet de comparer directement chaque angle du prisme et l'angle de sa cale à l'étalon primaire d'angle qui est le tour complet (fig. 2).

5. MÉTROLOGIE INDUSTRIELLE

En métrologie industrielle, ce sont d'abord les références mécaniques utilisées pour étalonner les instruments de mesure qui sont contrôlées par la lumière. C'est en observant les franges d'interférence données entre un miroir de référence et la face supérieure d'une cale en acier ou en carbure de tungstène que l'on peut déterminer l'épaisseur et les défauts de surface de la cale avec une incertitude de quelques millièmes de micromètre (quelques nanomètres).

La même observation peut se faire sur des plans optiques pour déterminer leur défauts de rectitude et de planéité. L'interférométrie ne révèle que l'écart entre la surface observée et la surface de référence. Mais on peut par la méthode dite des trois plans comparer une surface S_1 à une surface S_2 , puis la surface S_2 à une surface S_3 . La comparaison de la surface S_1 à la surface S_3 introduit une redondance qui permet d'attribuer à chaque surface son défaut propre par rapport à un plan idéal.

Des traitements numériques d'images permettent à des appareils industriels de donner une représentation tridimensionnelle des défauts de surfaces de pièces optiques avec une sensibilité de l'ordre de quelques nanomètres (miroirs plans par interférométrie de Fizeau, objectifs, miroirs convexes et concaves par interférométrie de Twyman-Green). De manière analogue, il est possible d'observer par holographie les interférences d'un objet quelconque avec lui-même et de mettre en évidence ses déformations avec une sensibilité interférométrique.

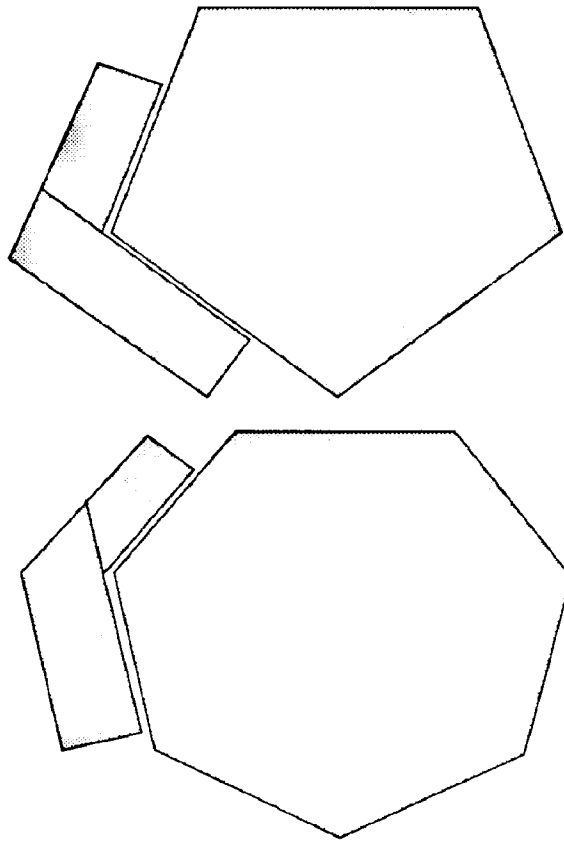


Figure 2 : Prismes en silice et leur cale, servant de référence angulaire pour le contrôle des goniomètres optiques. Ces prismes sont étalonnés par l'observation des franges d'interférence entre les faces du prisme et celles de la cale. Si l'on admet que les arêtes du prisme sont parallèles, connaissant la somme des angles du prisme, on peut par la seule mesure des petits écarts entre les angles déterminer la valeur de chaque dièdre, y compris celui de la cale de référence.

6. LES LASERS ET L'INTERFÉROMÉTRIE

L'apparition des lasers a rendu possible l'utilisation de l'interférométrie dans les ateliers industriels. Des interféromètres éclairés par des lasers stabilisés en fréquence permettent de mesurer des déplacements sur des machines outils ou des machines à mesurer sur plusieurs dizaines de mètres avec une incertitude de l'ordre du micromètre par mètre, et mieux si l'indice de l'air peut être bien contrôlé. Grâce aux techniques nouvelles de l'optique intégrée, certains de ces interféromètres ont été miniaturisés sur une puce de silicium de quelques millimètres de côtés, ce qui réduit considérablement leur coût (fig. 3).

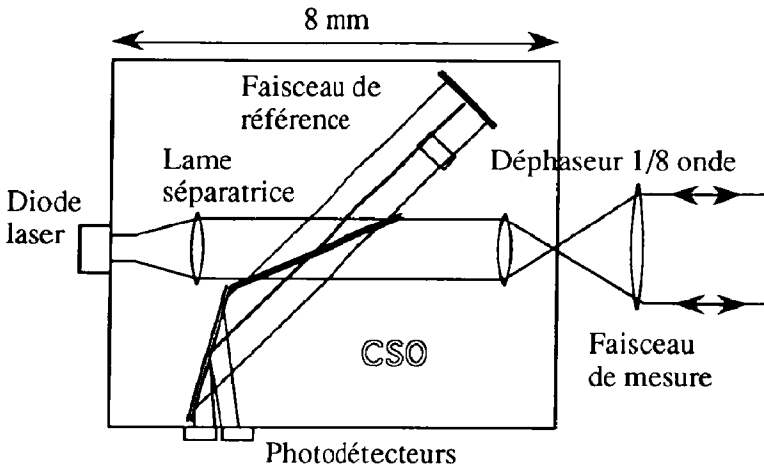


Figure 3 : Interféromètre de Michelson en optique intégrée sur une puce de silicium pour la mesure interférentielle des déplacements (d'après un document Compagnie des Senseurs Optiques, Grenoble). Le déphaseur 1/8ème d'onde traversé deux fois introduit un déphasage en quadrature entre les faisceaux reçus par les deux détecteurs, ce qui permet de distinguer les deux sens de défilement des franges.

7. LES LASERS ET LA MESURE GÉOMÉTRIQUE

Le laser est aussi utilisé dans des dispositifs purement géométriques pour effectuer des mesures de diamètre ou de position très rapide. Un faisceau laser fin balaye l'objet pendant qu'une caméra mesure la direction de l'impact du faisceau sur l'objet. La trigonométrie pour une mesure tridimensionnelle, ou plus simplement le temps d'obturation du faisceau pour une mesure de diamètre, permettent de faire des mesures dont l'exactitude relative est beaucoup plus modeste, mais permet, soit des mesures sans contact très rapides, soit des mesures sur des objets très compliqués comme une aube de turbine.

8. RÈGLES ET CERCLES OPTIQUES



Figure 4 : Règle optique incrémentale et son lecteur. Les deux moitiés de la règle donnent avec le lecteur deux signaux en quadrature qui permettent de distinguer les deux sens de déplacement. La technique des franges de moiré est analogue à celle de l'interférométrie laser à comptage de franges, elle est plus simple à mettre en oeuvre, mais elle est moins résolutive et moins exacte.

Enfin la lumière intervient de manière beaucoup plus technique dans des dispositifs de mesure de déplacement linéaire ou angulaire : ce sont les règles et les cercles incrémentaux et codés. Une règle optique incrémentale (ou un cercle incrémental) est un réseau de traits

alternativement transparents et opaques sur lequel se déplace un curseur constitué par un réseau identique. Les franges de moiré comptées par un système photo-électrique permettent d'afficher le nombre de traits du réseau qui ont été parcourus depuis la mise à zéro du compteur. Pour distinguer les deux sens de translation et faire un comptage réversible, le curseur comporte deux zones dont les traits sont décalés d'un quart de période. La variation de phase entre les deux plages (quadrature avance dans un sens, quadrature retard dans le sens opposé) permet de distinguer un déplacement vers l'avant et un déplacement vers l'arrière. Le pas des réseaux est de l'ordre d'une dizaine ou une vingtaine de micromètres, et un système d'interpolation permet d'afficher le micromètre.

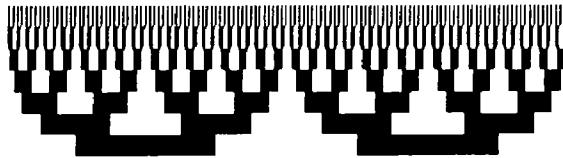


Figure 5 : Règle optique codée. C'est un code "Gray", c'est-à-dire que deux plages ne basculent jamais simultanément, évitant ainsi les erreurs liées à des défauts d'alignement des détecteurs sur les différentes plages. L'exactitude ne dépend que de la plage la plus résolvente. Le même code peut être utilisé sur un cercle pour la mesure des angles.

Un cercle codé (ou une règle codée) est un disque de verre sur lequel plusieurs plages comportent des réseaux de périodes diverses. La disposition des plages est telle que deux plages ne basculent jamais simultanément de transparent à opaque ou inversement. La donnée des états de toutes les plages (transparent ou opaque) permet de coder sans ambiguïté la position du disque ou de la règle. La précision de ces disques est essentiellement limitée par le pas du réseau et le diamètre du disque. Des études ont été faites pour adapter à cette technique la technologie du disque numérique laser. La précision atteinte est bien meilleure que la seconde d'angle.

9. LA LUMIÈRE ET LA SCIENCE : LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES

La lumière est enfin à la base de l'un des dispositifs de mesure les plus sensibles que l'homme ait jamais imaginé : l'interféromètre franco-italien Virgo, dont la construction vient de commencer en Toscane, dans la banlieue de Pise, pour détecter les ondes gravitationnelles. C'est un interféromètre de Michelson dont les deux bras de 3 km sont orthogonaux, dont la longueur effective est égale à 150 km.

Cette expérience peut être rapprochée de la fameuse expérience de Michelson et Morley dans laquelle un interféromètre à deux ondes, dont les deux bras repliés de 5 mètres de longueur étaient orthogonaux, a donné une stabilité de la frange d'ordre zéro meilleure que le centième de frange quand l'interféromètre tournait sur lui-même pour mettre alternativement un bras puis l'autre dans la direction de la translation de la Terre dans l'espace. Avec une sensibilité de $5 \cdot 10^{-10}$ déjà remarquable pour des observations exclusivement visuelles, Michelson avait ainsi ébranlé les concepts newtoniens de l'espace et du temps, ce qui devait conduire Albert Einstein à établir les bases de la théorie de la relativité qu'il développera plus tard. A. Brilliet (alors au Laboratoire de l'horloge atomique, Orsay) a repris cette expérience

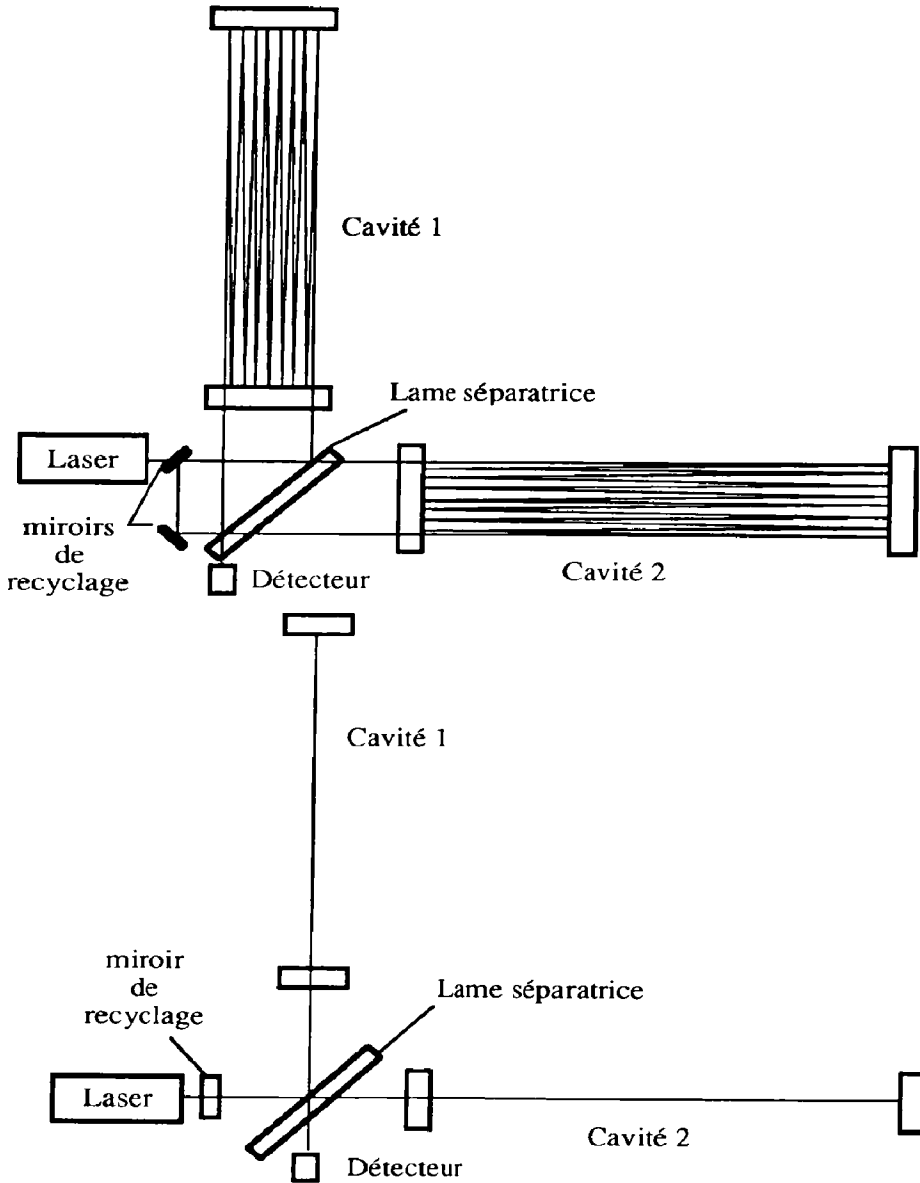


Figure 6 : Schéma de l'interféromètre Virgo pour la détection des ondes gravitationnelles. C'est un interféromètre de Michelson à deux bras perpendiculaires de 3 km de longueur. En haut les faisceaux sont repliés 50 fois pour donner un trajet effectif de 300 km sur un aller et retour, et la lumière émergente est recyclée en phase dans l'interféromètre. Le schéma final équivalent avec un miroir d'entrée de recyclage et deux cavités Fabry-Perot de finesse 50 est donné sur la partie inférieure de la figure.

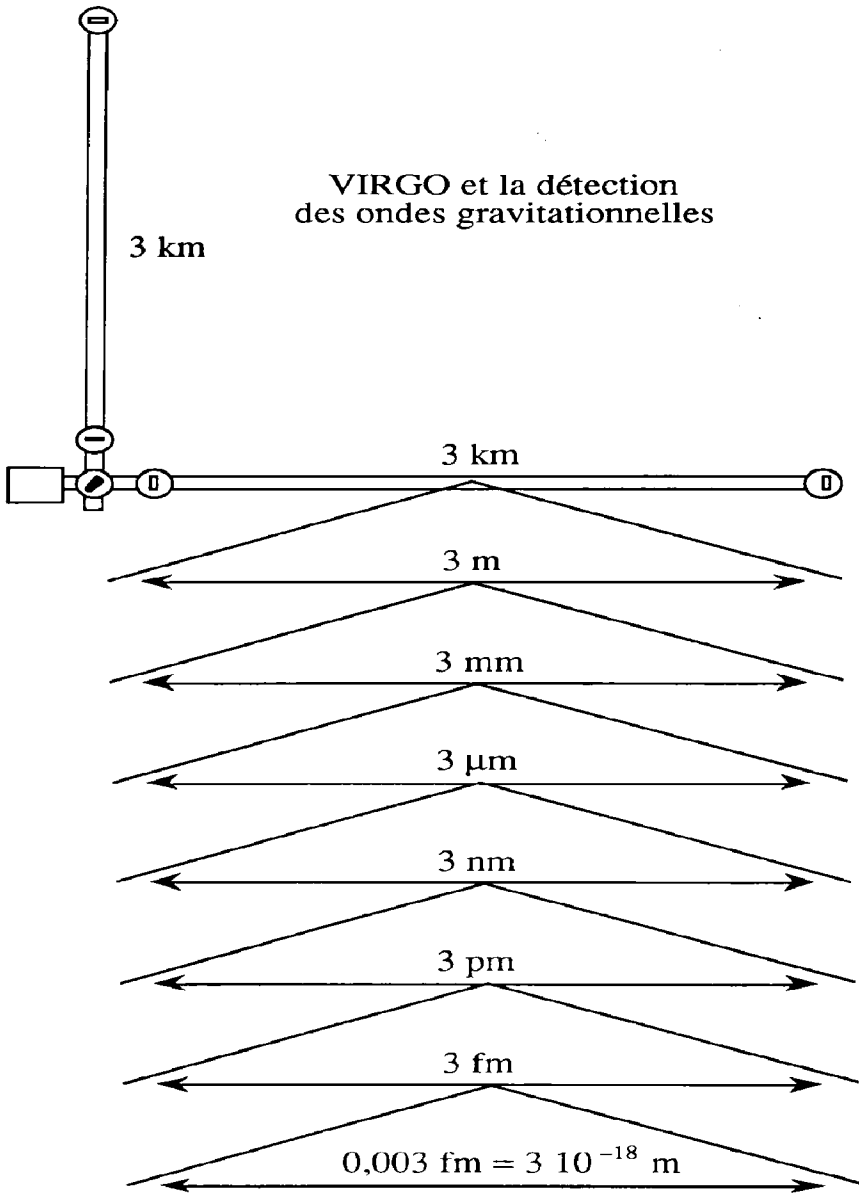


Figure 7 : VIRGO et la détection des ondes gravitationnelles. Si les espoirs des physiciens se confirment, la limite de détection devrait être donnée par le bruit de photons dans les cavités résonnantes et se situer au niveau de $3 \cdot 10^{-18}$ m sur 300 km, conduisant à une sensibilité relative égale à 10^{-23} sur une variation de distance, performance qui ne fut jamais approchée par l'homme dans aucun domaine.

avec son collègue J. Hall du Joint Institute for Laboratory Astrophysics (Boulder) avec des lasers et des cavités Fabry-Perot, multipliant à peu près par 50 000 la sensibilité du montage.

A. Brilliet est à l'origine du programme franco-italien Virgo qui reprend l'expérience de Michelson et Morley, non pour détecter une variation de longueur des bras de l'interféromètre liée à la rotation de la Terre dans l'espace, mais pour détecter une des conséquences les plus importantes de la théorie de la relativité générale qui n'a pas encore été formellement vérifiée, la propagation dans l'espace d'ondes de gravitation.

Pour ce faire on construit près de Pise un interféromètre à deux bras perpendiculaires de 3 km de longueur, chaque bras comportant une cavité Fabry-Perot de finesse 50, c'est-à-dire faisant subir à la lumière une cinquantaine d'aller et retour ce qui portent la longueur effective des bras à 150 km. Tout l'interféromètre est dans un vide poussé (10^{-5} Pa, comme dans les accélérateurs de particules) et chaque élément est supporté par un système antisismique dont le facteur d'atténuation est considérable (10^{-9} à 10 Hz). Un laser stabilisé en fréquence et en amplitude, dont la puissance est de l'ordre de 10 à 20 watts, éclairera cet interféromètre et maintiendra une puissance moyenne de l'ordre du kilowatt dans les deux cavités résonnantes des deux bras de l'interféromètre. Le passage d'une onde gravitationnelle convenablement polarisée devrait perturber une interférence presque complètement destructive maintenue par des asservissements. Les auteurs du projets espèrent ainsi pouvoir déceler des variations de longueur d'un bras par rapport à l'autre de l'ordre de 10^{-18} m (un milliardième de nanomètre) sur 150 km, ce qui pulvérise tous les records de sensibilité jamais atteints dans aucun dispositif construit par l'homme.

10. CONCLUSION

On voit sur ces exemples, qui constituent une liste non exhaustive, que la lumière est un outil incomparable pour les mesures géométriques à toutes les échelles. Parmi ses avantages, nous citerons sa vitesse de propagation, très grande et très bien connue, son caractère non destructif et non perturbateur, le fait que cette lumière peut être très bien collimatée, et peut donner avec des puissances minimales des rapports signal sur bruit excellents. Dans un faisceau de lumière correctement utilisé, on peut faire entrer une quantité considérable d'informations temporelles, spatiales ou spectrales. La lumière est un outil souple et efficace. Elle permet de raccorder les mesures à l'une des constantes naturelles les plus fondamentales, la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, mais elle permet aussi de mettre au point des instruments à la fois pratiques et performants, tant pour les scientifiques que pour les industriels.

Bibliographie

- [1] Bouchareine P., Le mètre, la seconde et la vitesse de la lumière, *La Recherche* (1978) No 91, p. 634-643.
- [2] Bouchareine P., Giacomo P., Evolution de l'étalon de longueur, *Bulletin d'Information du Bureau National de Métrologie* (1975), No 20, p. 13-20.
- [3] Terrien J., Standards of length and time, *Rep.Prog.Phys.*, **39** (1976), p. 1067.
- [4] Froome K.D., Essen L., The velocity of light and radio waves (Ac.Press, 1969).
- [5] Evenson K.M., Barger R.L., Hall J.L., *Phys.Rev.Letters*, **29** (1972), p. 1346.
- [6] Terrien J., International agreement on the value of the velocity of light, *Metrologia*, **10** (1974), No 9.

- [7] Pierron F., Télémétrie Laser satellites ; la station de Grasse, *Bull.Inf. I.G.N.* **84**, **2**.
- [8] Froome K.D., Precision distance measurement based on the velocity of light, *Sci.Prog.,Oxf.* **59** (1971), p. 199-223.
- [9] Bradsell R.H., A simple calibrator for the Mekometer, *Survey Review*, **XXIV** (1977), 186, p. 172-175.
- [10] Froome K.D., Bradsell R.H., Long term stability of an N.P.L. Mekometer III wavelength standard, *Survey Review*, **XXIV** (1977), 186, p. 166-171.
- [11] Cahill T., Dorman J., Relative lateration across the Los Angeles basin using a satellite laser ranging system, *Bull.Géod.* (1982), No 56, p. 329-340.
- [12] Bourdet G.L., Orszag A., Absolute distance measurements by CO₂ laser multiwavelength interferometry, *Appl. Optics*, **18** (1979), No 2, p. 225-227.
- [13] Edlen B., The refractive index of air, *Metrologia*, **2** (1966), No 2, p. 71-80.
- [14] Querzola B., High accuracy distance measurement by two-wavelength pulsed laser sources., *Appl. Optics*, **18** (1979) No 17, p. 3035-3047.
- [15] Abshire J.B., Pulsed multiwavelength laser ranging system for measuring atmospheric delay, *Appl. Optics*, **19** (1980), No 20, p. 3436-3440.
- [16] Gardner C.S., Effects of random path fluctuations on the accuracy of laser ranging systems, *Appl. Optics*, **15** (1976), No 10, p. 2539-2545.
- [17] Shipley G., Bradsell R.H., Georan I a compact two color EDM instrument, *Survey Review*, **XXIII** (1976), 179, p. 210-233.
- [18] Kasser M., Le Géoran II, nouvel appareil de mesure de distances à deux couleurs, *Opto* **82** 1982, p. 176-178.
- [19] Techniques d'utilisation des photons, Edit. Dopée (Électricité de France), 1992.