

Histoire de la spectroscopie (2) : de l'expérience de Michelson-Morley à la spectroscopie de Fourier

Jean-Pierre Maillard, Institut d'Astrophysique de Paris (jean-pierre.maillard@iap.fr)

Dans cette seconde partie, Jean-Pierre Maillard aborde la spectroscopie de Fourier

L'article I publié dans le numéro 159 des Cahiers Clairaut (septembre 2017) retrace les débuts de la spectroscopie à l'aube du XIX^e s. au moyen du *spectroscope à prisme* dont le détecteur était l'œil, progressivement remplacé par le *spectrographe à réseau*, plus résolvant et utilisant la plaque photographique pour enregistrer le spectre. Les spectrographes resteront limités à la lumière visible jusqu'à l'apparition des premières cellules photoélectriques, sensibles à d'autres longueurs d'onde, à partir des années 30. L'accès à ces domaines pour la spectroscopie nécessitait l'usage de *monochromateurs*, des spectromètres à réseau avec une fente de sortie pour isoler une longueur d'onde dont la lumière était reçue par la cellule, une rotation du réseau permettant de changer de longueur d'onde. Le procédé s'avérait long et ne permettait que l'étude de petits domaines spectraux ou des spectres à basse résolution.

Le besoin d'étendre l'analyse spectroscopique, en particulier dans le domaine infrarouge, a motivé l'intérêt à partir des années 50 pour une méthode qui ne soit plus basée sur un système dispersif, appelée *spectroscopie de Fourier*, qui rendait possible la couverture d'un grand domaine spectral, tout en n'utilisant toujours qu'une seule cellule. Basée sur l'*interféromètre de Michelson*, du nom de son inventeur, qui fit avec, au tournant du XX^e siècle, les premières mesures de spectroscopie, l'origine de cette nouvelle méthode, puis sa redécouverte près de 70 ans plus tard et les développements qui ont suivi, en particulier en astronomie, sont décrits.

Invention de l'interféromètre de Michelson et expérience de Michelson-Morley

Au début du XIX^e s. de vifs débats se déroulent sur la nature de la lumière, entre les tenants de la théorie

corpusculaire, développée dès 1675 par Newton (1642–1727), et les partisans de la théorie ondulatoire exposée par Augustin Fresnel (1788 – 1827) qui s'appuie sur l'hypothèse de l'existence d'un support matériel nommé *éther lumineux* emplissant tout l'Univers. Les oscillations périodiques des ondes lumineuses ont besoin de ce milieu pour se propager, par analogie avec les ondes sonores qui se propagent dans l'air.

Le physicien autrichien Christian Doppler (1803–1853) a montré le changement de fréquence du son d'une source sonore mobile et Hippolyte Fizeau (1819–1896) le changement de longueur d'onde d'une source lumineuse en mouvement. Se plaçant dans le cadre de la théorie de Fresnel, il écrit en 1851 : « *Si l'on suppose que l'éther est entraîné en totalité avec le corps, la vitesse de la lumière dans ce corps sera augmentée de toute la vitesse du corps, le rayon étant dirigé dans le sens du mouvement. Si l'éther est supposé libre, la vitesse de la lumière ne sera nullement altérée.* »

Pour tester l'hypothèse d'un possible *entraînement de l'éther* par les corps lumineux en mouvement, Fizeau tente de mettre en évidence une différence de vitesse de la lumière se propageant dans un courant d'eau qui s'écoule dans un sens et dans le sens opposé. Il construit à cet effet pour la sensibilité permise un montage optique dit *interférométrique* (voir encadré).

Dans le montage de Fizeau (figure 1) la lumière du Soleil est partagée en deux faisceaux qui suivent deux trajets de même longueur, parcourus dans l'eau s'écoulant dans un sens pour l'un et dans le sens opposé pour l'autre. Si la mise en mouvement de l'eau entraîne une différence de vitesse de la lumière dans les deux faisceaux, elle se traduira en sortie par un changement d'intensité des interférences. Fizeau ne peut mesurer de changement appréciable.

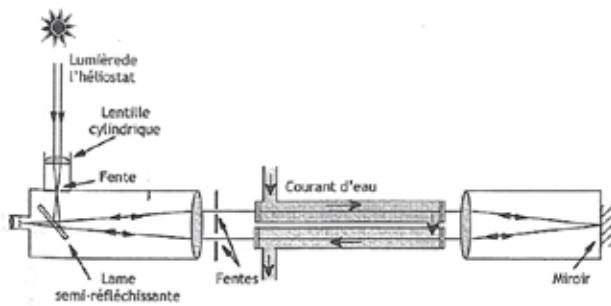


Fig. 1. Expérience de Fizeau (1851) pour tester l'hypothèse de l'entraînement de l'éther.

Montage interférométrique à deux ondes

Dans un tel montage, la lumière d'une source de longueur d'onde λ est partagée en deux faisceaux d'intensité égale qui effectuent des trajets optiques différents. Conséquence de la nature ondulatoire de la lumière qui se propage à une vitesse finie, la différence de longueur de parcours entre les deux ondes crée un retard égal à δ/c où δ est la différence de chemin optique et c la vitesse de la lumière. En exprimant δ en nombre de longueurs d'onde λ , si $\delta = k\lambda$ avec k un nombre entier, les deux ondes sont en phase. Après recombinaison, leurs amplitudes s'ajoutent donnant un maximum de lumière. Mais si $\delta = (k + \frac{1}{2})\lambda$ les deux ondes sont en opposition de phase et l'intensité s'annule. Prenons une lampe à hydrogène dont on a isolé la raie $H\alpha$ à 656 nm, un changement de $\delta = \lambda/2 = 328$ nm représente la quantité pour passer d'un maximum de lumière à l'extinction, ce qui fait réaliser la sensibilité d'un tel dispositif. Un changement de $\delta = \lambda$ fait passer d'un maximum de lumière au suivant (ou d'un zéro au suivant) est appelé une frange. Le montage de Fizeau (figure 1) donne l'exemple d'un montage avec formation des deux ondes interférentes par séparation spatiale du faisceau d'entrée, tandis que dans le montage inventé par Michelson (figure 2) la formation des deux ondes est faite en intensité par une lame séparatrice.

Un jeune opticien américain, Albert Michelson (1852–1931), qui enseigne alors à l'Académie Navale près de Washington, a reproduit l'expérience de mesure de la vitesse de la lumière par la méthode du miroir tournant de Léon Foucault (1819–1868) en portant la base du parcours de la lumière à 605 m. Il fait l'analyse que la vitesse de la lumière mesurée sur Terre doit dépendre de sa direction de propagation par rapport à celle du déplacement de la Terre dans l'éther, supposé le milieu de référence. La mesure d'une différence de vitesse entre une lumière se propageant dans le sens du mouvement de rotation de la Terre et dans une direction perpendiculaire, apporterait la preuve de l'entraînement de l'éther. Pour cette mesure, il reprend l'idée de Fizeau de mettre à profit le phénomène d'interférence lumineuse (*voir encadré*) mais en inventant un montage dénommé depuis *interféromètre de Michelson* (figure 2).

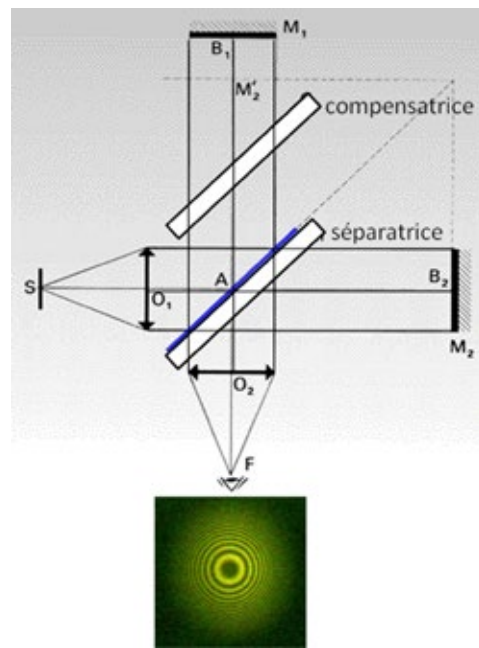


Fig. 2. Schéma de l'interféromètre de Michelson (inventé en 1881). La lame à faces parallèles dans le bras M_1 d'épaisseur égale à la séparatrice est appelée lame compensatrice.

Une source étendue en S émet une seule longueur d'onde λ qui tombe sur une lame à 45° ayant la propriété de partager le faisceau incident en une moitié réfléchi et l'autre moitié transmise. Les deux faisceaux perpendiculaires tombent chacun sur un miroir plan (M_1 et M_2) renvoyant chacun la lumière vers la séparatrice, qui recombine les deux faisceaux, produisant en F une figure d'anneaux sombres, manifestation des interférences entre les deux faisceaux. Avec M_2' l'image de M_2 dans la séparatrice, la lumière dans le bras M_1 fait un parcours $2M_1M_2'$ plus long que dans le bras M_2 qui représente la différence de chemin δ sur l'axe.

Michelson séjourne à Berlin où il construit le premier modèle de son interféromètre. Pour être « loin du trafic de la ville » il l'installe à l'Observatoire de Postdam, sur une table tournante, les bras de l'interféromètre de 1 m de long orientés, l'un selon le mouvement de rotation de la Terre (est–ouest), l'autre selon la direction perpendiculaire (nord–sud). Les longueurs optiques des deux bras sont rigoureusement identiques de telle sorte que l'intensité des interférences est uniforme dans tout le champ de sortie. Sans changer le réglage, il refait l'observation en tournant l'interféromètre de 90° . Il compare plusieurs fois l'état d'interférence dans les deux positions de l'instrument sans détecter visuellement de différence d'intensité des franges.

Mais Michelson qui croit à l'existence de l'éther conclut à l'échec de son expérience. Il la refait donc en 1887 à l'Université de Cleveland, aidé du

physicien W. Morley, association qui donnera le nom resté célèbre de l'expérience, en construisant un interféromètre sur le même schéma optique mais avec des bras de 11 m, pour une sensibilité accrue. Il monte en plus tout l'instrument sur un bain de mercure pour le faire tourner de 90° sans risque de le dérégler. Il répète plusieurs fois l'expérience et obtient toujours le même résultat nul qu'il publie dans « *On the relative motion of the Earth and the luminiferous æther* » (*Philosophical Mag.*, 24, 449, 1887). Ces expériences négatives remettent sérieusement en question l'existence de l'éther. Des expériences semblables pourtant seront refaites jusqu'en 1927 avec des interféromètres encore plus grands, mais la constance de la vitesse de la lumière, pratiquement égale à 300 000 km/s dans le vide, dont Michelson a d'ailleurs contribué à améliorer la précision de la mesure, sera définitivement établie en 1915 par Einstein par la publication de la théorie de la relativité générale.

Application par Michelson de son interféromètre à la spectroscopie

Mais après cette expérience de Cleveland, Michelson entrevoit d'autres possibilités à son interféromètre en rendant mobile l'un des deux miroirs, avec une vis à pas fin qui permet de déplacer avec précision un miroir parallèlement à lui-même (figure 3) et de changer ainsi la différence de marche optique entre les deux faisceaux qui interfèrent. Un monochromateur à prisme éclaire l'entrée de l'interféromètre avec la raie intense d'une source atomique (ex. la raie rouge d'une source à cadmium). En traduisant lentement le miroir mobile par rotation de la vis qui porte le miroir, à partir de l'égalité de la longueur des deux bras, il augmente δ et compte à l'œil les franges qui défilent pour effectuer des mesures suivantes sur ces raies.

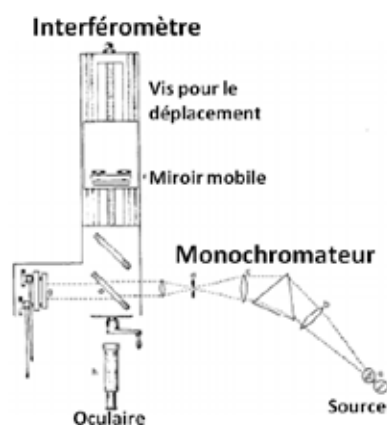


Fig.3. Dessin par Michelson du montage qu'il réalise pour effectuer ses premières mesures de spectroscopie avec son interféromètre.

1. Mesure de la longueur d'onde de la raie : en comptant le nombre N de franges pour un déplacement donné l du miroir.

2. Mesure de la séparation des deux composantes d'une raie double : l'interféromètre étant éclairé par une source qui délivre une telle raie (ex. la raie jaune du sodium), Michelson constate que l'intensité des franges diminue jusqu'à s'annuler puis augmente à nouveau, s'annule encore et ainsi de suite. Il détermine comme en 1) la période des franges et mesure la longueur du chemin optique nécessaire d pour passer d'une annulation des franges à la suivante.

3. Mesure de la visibilité des franges produite par une raie simple : en effectuant la mesure 1) Michelson constate qu'en augmentant δ les anneaux brillants deviennent progressivement moins brillants et les anneaux sombres moins noirs. En d'autres termes, le *contraste des franges* (figure 4) diminue, jusqu'à ne plus discerner d'anneaux brillants ou sombres à une position du miroir mobile qui correspond à une valeur δ_M de δ caractéristique de la raie. Il nomme cette variation du contraste des franges avec δ la *courbe de visibilité*.

Il publie en 1892 ses premières mesures sur les raies d'émission les plus intenses de plusieurs sources atomiques obtenues par *spectroscopie interférentielle* : hydrogène (raies H_α et H_β), oxygène, sodium, zinc, cadmium, mercure, thallium, leur longueur d'onde précise, leur nature, simple ou multiple – il montre pour la première fois que la raie jaune du sodium est double et mesure la séparation des deux composantes égale à 0,59 nm – et leur longueur de visibilité δ_M .

Interprétation des mesures effectuées par Michelson

Les trois types de mesures réalisées par Michelson utilisent le fait qu'une lumière de longueur d'onde λ_0 et d'intensité B_0 qui éclaire l'interféromètre donne en sortie, en fonction de δ , un signal périodique (figure 4) d'intensité $I(\delta)$ – le facteur $1/2$ vient de ce que seulement la moitié de la lumière incidente sort de l'instrument.

$$I(\delta) = \frac{1}{2} B_0 [1 + \cos(2\pi \delta/\lambda_0)]$$

Le comptage d'un nombre N de franges pour un déplacement l du miroir conduit donc à $\lambda_0 = 2l/N$. L'équation a entraîné l'introduction d'une nouvelle grandeur, le *nombre d'onde* $\sigma = 1/\lambda$ exprimé en inverse de cm ou cm^{-1} . Supposons une raie double avec deux composantes σ_1 et σ_2 de même intensité B_0 . Le signal de sortie $I_{1,2}(\delta)$ est la somme des contributions de chaque composante :

$$I_{1,2}(\delta) = \frac{1}{2} B_0 \{ [1 + \cos(2\pi \sigma_1 \delta)] + [1 + \cos(2\pi \sigma_2 \delta)] \}$$

qui se résout en un produit de deux fonctions circulaires, l'une avec $\sigma' = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ et l'autre $\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$. On peut mesurer $\lambda' = 1/\sigma'$ la longueur d'onde des franges et le déplacement $d = 1/\sigma_d$ dont on déduit la longueur d'onde des deux composantes, $\lambda_1 = 1/(\sigma' - \sigma_d)$ et $\lambda_2 = 1/(\sigma' + \sigma_d)$ et leur séparation $|\lambda_2 - \lambda_1|$.

Une raie en émission est représentée par un profil symétrique d'une certaine largeur. En imaginant le découpage de ce profil en bandes étroites verticales d'égale largeur, chaque bande produit dans l'interféromètre une fonction de type $I(\delta)$, avec sa période et son intensité, légèrement différentes de celles de sa voisine dans le profil. Pour $\delta = 0$ toutes ces fonctions sont en phase, mais en s'écartant de 0 les périodes ne sont plus exactement en phase, ce qui fait progressivement diminuer le contraste des franges (figure 4) jusqu'à ce qu'il devienne nul. La courbe de visibilité est une fonction décroissante de δ variant de 1 à 0 qui multiplie le signal de franges, et qui dépend de la largeur du profil de la raie.

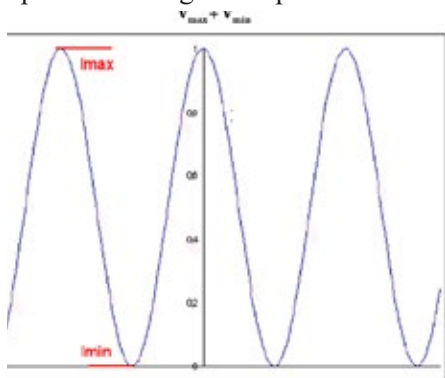


Fig.4. Représentation d'un signal de frange et définition du contraste de ce signal, ici égal à 1.

Principe de la spectroscopie de Fourier

Michelson fit des mesures spectroscopiques seulement sur des raies uniques en émission, éventuellement formées de plusieurs composantes. Ce que l'on appellera plus tard la *spectroscopie de Fourier* est une généralisation à des sources dont la lumière est composée d'une multitude de raies, en émission ou en absorption (*voir article 1*) sur un grand domaine spectral afin d'en obtenir le spectre complet. Mais pour cela, un outil mathématique est nécessaire, dû à l'origine au physicien Joseph Fourier (1768 – 1830). Il a montré qu'une fonction périodique quelconque pouvait être décomposée en une somme de fonctions trigonométriques, appelée *série de Fourier*. S'il s'agit d'une fonction temporelle $F(t)$ les fonctions trigonométriques seront de la forme $\cos(2\pi\omega_i t)$ avec chacune un coefficient a_i . L'ensemble des fréquences discrètes $1/\omega_i$, avec leurs intensités propres a_i forme le spectre associé à

la fonction $F(t)$. Elle peut représenter le son produit par un instrument de musique et cette décomposition donnera les fréquences sonores simples qui le constituent.

Plus tard, cette analyse fut appliquée à des fonctions $F(t)$ non périodiques. La fonction spectre associée n'est plus dès lors formée de fréquences discrètes mais par une fonction continue $G(\nu)$ de fréquence ν . L'opération de passage de $F(t)$ à $G(\nu)$ est appelée la *transformation de Fourier (T.F.)* et $G(\nu)$ la *transformée de $F(t)$* , en référence à l'auteur des séries de Fourier. Toute lumière couvrant un grand domaine spectral est décrite par un spectre représenté par une fonction $B(\sigma)$. En éclairant l'interféromètre de Michelson avec cette lumière et en augmentant δ à partir de 0, il génère en sortie un signal représenté par une fonction $B + I(\delta)$ avec B un terme constant, égal à l'intensité totale de la lumière entrée dans l'interféromètre et $I(\delta)$ l'*interférogramme*. L'opération réalisée par l'interféromètre s'écrit :

$$I(\delta) = \int B(\sigma) \cos(2\pi\sigma\delta) d\sigma \text{ ou } I(\delta) = \mathbf{T.F.}\{B(\sigma)\}.$$

Dans les cas simples des mesures faites par Michelson, une raie laser éclairant l'interféromètre est assimilable à une fonction représentée par un simple pic. La fonction circulaire qui décrit le signal de frange est bien la T.F. de la fonction pic et la courbe de visibilité d'une raie naturelle découverte par Michelson, la T.F. de la fonction décrivant le profil de cette raie. Réalisée naturellement par l'interféromètre, cette transformation constitue la base d'une méthode de spectroscopie car cette même transformation peut s'appliquer à $I(\delta)$, qui restitue la fonction $B(\sigma)$, le spectre recherché de la source :

$$B(\sigma) = \int I(\delta) \cos(2\pi\sigma\delta) d\delta$$

Ces deux transformations inverses résument le principe de la spectroscopie de Fourier.

Développements de la spectroscopie de Fourier

Michelson avait réalisé le principe de cette nouvelle méthode de spectroscopie mais n'avait aucun moyen de la mettre en œuvre, ce qui demandait d'enregistrer à la sortie de son instrument l'interférogramme d'une source puis le recours à un ordinateur pour en déduire le spectre. Il faudra donc attendre tous ces développements pour que la méthode prenne son essor. Avant cela, le physicien Peter Felgett (1922 – 2008) dans sa thèse en 1951 démontre l'avantage en sensibilité qu'aurait un spectromètre basé sur cette méthode, équipé avec les nouvelles cellules infrarouges (1 – 3,5 μm), comparé à un monochromateur, seul instrument alors pour accéder à ce domaine. Il appelle cette propriété *avantage multiplex* du fait que

l'instrument permet d'observer avec un seul détecteur tout le spectre, pendant tout le temps d'observation, alors que le monochromateur n'observe qu'une raie à la fois.

Le deuxième pionnier est le physicien Pierre Jacquinot (1910–2002) qui en 1954 montre que l'on peut éclairer l'interféromètre de Michelson avec une source étendue car il peut accepter une ouverture d'entrée circulaire et sera donc plus lumineux que le monochromateur qui demande une fente étroite. Il établit que le produit $R \times \theta$ est constant, avec R la résolution (voir article I) et θ le diamètre angulaire de l'ouverture d'entrée. Ensuite Jeanine Connes (1926–) dans le laboratoire de Jacquinot fait sa thèse en 1961 intitulée « *Recherches sur la spectroscopie par transformation de Fourier* » qui établit les bases théoriques de la méthode. Elle obtient en démonstration un premier résultat avec le spectre du ciel nocturne dans le domaine $1,6 \mu\text{m}$ à une résolution de 900, calculé sur un des premiers ordinateurs IBM. À partir de cette étape fondatrice, les développements se multiplient avec la construction dans de nombreux laboratoires et derrière des télescopes des spectromètres de Fourier dans l'infrarouge, dénommés communément FTS pour *Fourier Transform Spectrometer*. Les principaux domaines d'application sont d'abord l'astronomie avec comme premiers résultats notables publiés en 1969, des spectres infrarouges complets entre $1,17 - 2,53 \mu\text{m}$ des planètes Vénus et Mars, obtenus à l'Observatoire de Haute-Provence, à une résolution jamais atteinte de $R \approx 10^5$ sur ces sources, trois fois supérieure à celle alors des meilleurs spectres solaires. D'autres résultats sur un large domaine, à des résolutions même supérieures, sont obtenus sur des sources atomiques au laboratoire de Jacquinot.

La méthode sera découverte aux États-Unis grâce à une première conférence dédiée à cette méthode en 1970 dans le Colorado où les résultats spectaculaires obtenus en France sont présentés. Elle entraînera la construction de nombreux FTS astronomiques, en particulier pour les télescopes de Kitt Peak en Arizona (1975, 1979) et un autre (1980) installé à bord d'un avion équipé d'un télescope, le *Kuiper Airborne Observatory*. Ces succès incitèrent la NASA à installer un FTS couvrant le domaine 4 à $55 \mu\text{m}$ à bord des sondes Voyager 1 et 2. La première visitera Jupiter et Saturne entre 1979 et 80, tandis que la seconde survolera les quatre planètes géantes entre 1979 et 1989, l'une et l'autre délivrant des quantités de spectres inédits de ces planètes. Le nouveau télescope Canada-France-Hawaï (CFH) de $3,6 \text{ m}$ inauguré en 1980 est équipé d'un FTS infrarouge à haute

résolution qui fut à l'origine de nombreux résultats sur la composition des atmosphères planétaires, la physique stellaire et sur des régions de formation stellaire.

Conclusion

Le développement de la méthode s'est poursuivi, bénéficiant des progrès des détecteurs infrarouges et pour la spectroscopie moléculaire de laboratoire, dans l'étude détaillée de la composition de l'atmosphère terrestre et en astronomie. Là, elle s'est maintenue jusque dans les années 2000 mais depuis, son utilisation a décliné car le spectrographe à réseau s'est imposé avec les mosaïques de détecteurs comme indiqué dans l'article I. L'avantage multiplex qui avait fait la grande force du FTS a disparu au profit du spectrographe à réseau. Par cette propriété multiplex, un large spectre obtenu avec un seul détecteur, il se trouve pénalisé, car le détecteur reçoit un bruit venant de tout le domaine spectral couvert qui affecte tout le spectre, contrairement au spectrographe équipé d'une mosaïque de détecteurs, ce qui n'est pas acceptable car les sources astronomiques sont le plus souvent faibles.

Toutefois, le développement des mosaïques de détecteurs a permis de créer un nouveau type de FTS, appelé *FTS imageur* où le détecteur unique d'origine est remplacé par une caméra faisant l'image du champ d'entrée. Cette association permet alors d'enregistrer en parallèle sur un grand champ autant de spectres qu'il y a de pixels dans le détecteur et d'obtenir ainsi des cartes sur ce champ d'un gaz détecté par ses raies d'émission. Un tel instrument (figure 5) est en service au télescope Canada-France-Hawaï (CFH) depuis 2015, couvrant un champ de $11' \times 11'$, ce qui est sans équivalent dans le monde. Des projets dans d'autres domaines spectraux sont à l'étude. ■



Fig.5. Le FTS imageur dénommé SITELLE au foyer Cassegrain du télescope CFH. En vert, on voit les deux caméras pour le domaine $350 - 970 \text{ nm}$.