

RECOMMANDATION UIT-R RA.1630-0*,**

Caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes d'astronomie au sol à utiliser dans les études de partage avec les services actifs entre 10 THz et 1 000 THz***

(2003)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les fréquences comprises entre 400 THz et 750 THz sont utilisées pour les observations astronomiques depuis des siècles et que ce n'est qu'au cours des 30 dernières années que les progrès technologiques ont permis d'explorer pleinement l'ensemble du spectre compris entre 10 THz et 1 000 THz;
- b) que les observations effectuées entre 10 THz et 1 000 THz fournissent des données essentielles pour répondre à certaines questions d'astronomie fondamentales auxquelles les seules observations astronomiques effectuées au-dessous de 275 GHz ne permettent pas d'apporter une réponse;
- c) que le spectre entre 10 THz et 1 000 THz est aussi utilisé pour la recherche astronomique et pour de nombreuses autres applications;
- d) que la technologie des observations astronomiques entre 10 THz et 1 000 THz ne cesse d'évoluer;
- e) que les astronomes amateurs effectuent aussi régulièrement des observations astronomiques depuis la Terre, dans le domaine du visible entre 400 et 750 GHz;
- f) que les fréquences entre 10 THz et 1 000 THz sont actuellement utilisées pour les liaisons de données, les dispositifs de mesure de distance et d'autres systèmes actifs installés sur des plates-formes au sol ou des plates-formes spatiales et qu'en raison du développement et de l'augmentation rapides du nombre de ces systèmes, les brouillages potentiels entre systèmes actifs et systèmes passifs risquent d'augmenter;
- g) que de nombreuses applications de services actifs ou passifs exploités entre 10 THz et 1 000 THz sont très similaires à celles actuellement utilisées à des fréquences inférieures du spectre électromagnétique;
- h) qu'il y a des différences importantes entre les technologies utilisées dans cette partie du spectre et celles utilisées à des fréquences inférieures (nombre de photons décomptés en fonction de la puissance intégrée sur le temps), mais qu'il y a aussi beaucoup d'analogies (les deux sont utilisées pour les observations du continuum et les observations des raies spectrales);
- j) qu'il est temps de réfléchir à la nature de mesures de protection et aux conditions de partage pour que les télescopes astronomiques au sol puissent continuer de fonctionner sans subir de brouillage,

* La présente Recommandation doit être portée à l'attention de l'Union astronomique internationale (UAI) et de l'Union radioscopique internationale (URSI).

** La Commission d'études 7 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à la présente Recommandation en 2017 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

*** 1 THz = 1 000 GHz.

reconnaisant

- a) que l'UIT-R n'a pas étudié l'utilisation et le partage du spectre entre 10 THz et 1 000 THz,

recommande

1 aux astronomes de tenir compte dans le choix des sites des observatoires et la conception de l'instrumentation des brouillages que peuvent causer les émetteurs exploités entre 10 THz et 1 000 THz;

2 aux astronomes de fournir aux Commissions d'études des radiocommunications concernées des informations sur les derniers progrès technologiques réalisés en ce qui concerne les observations réalisées à partir de télescopes au sol, dans la gamme des fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz;

3 de tenir compte des paramètres techniques et opérationnels examinés dans les Annexes 1 et 2 dans les études des brouillages causés aux systèmes de radioastronomie exploités à des fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz.

Annexe 1

1 Introduction

Les télescopes au sol exploités aux fréquences inférieures à 275 GHz ainsi qu'entre 10 THz et 1 000 THz (30 μm à 0,3 μm) permettent d'observer des objets très divers dans l'Univers. Les mesures effectuées dans différents domaines fréquentiels donnent habituellement des informations sur les propriétés physiques (température, densité et distribution spatiale) des divers états des différentes composantes (étoiles, gaz, poussières) qui constituent les objets observés ainsi que sur les champs magnétiques locaux. En règle générale, plus la gamme de fréquences couverte par les observations est grande, plus les informations que l'on peut obtenir sur les conditions physiques locales sont détaillées. Par ailleurs, certains types d'objets cosmiques peuvent être étudiés uniquement ou plus facilement aux fréquences inférieures à 275 GHz ou entre 10 THz et 1 000 THz (30 μm à 0,3 μm).

Les astronomes utilisent depuis près de 400 ans des télescopes pour faire des observations entre environ 400 THz et 750 THz (0,75 μm et 0,4 μm). Au cours des 30 dernières années, la technologie des détecteurs a permis d'élargir les bandes disponibles pour la recherche astronomique et d'aller jusqu'aux fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz (30 μm à 0,3 μm). Pour les fréquences comprises entre 10 THz et 300 THz (30 μm et 1 μm), les astronomes parlent généralement «d'infrarouge», alors que pour le spectre compris entre 300 THz et 1 000 THz (1 μm et 0,3 μm), ils parlent généralement de fréquences «optiques». La gamme de fréquences comprise entre 10 THz et 1 000 THz est optimale pour les études des émissions thermiques cosmiques et pour un grand nombre de raies spectrales provenant d'atomes ou de molécules. Au cours des 30 dernières années, les progrès technologiques réalisés ont permis aux astronomes de détecter certains signaux qu'il n'était possible autrefois de détecter qu'à partir de plates-formes en orbite. Des astronomes amateurs effectuent des observations dans le spectre compris entre 400 THz et 750 THz (0,75 μm et 0,4 μm).

Différents pays et des consortiums internationaux font actuellement de gros investissements pour construire des observatoires équipés de très grands miroirs (antennes) d'un diamètre de 10 m ou plus qui, conjugués à des détecteurs modernes, permettront d'atteindre des sensibilités sans précédent.

De la même manière, l'avènement de lasers fiables et bon marché a conduit à une révolution dans les applications actives, notamment les liaisons de données et les liaisons de communication large bande, espace-espace, Terre vers espace et espace vers Terre, les radars et d'autres dispositifs de mesure de la distance.

L'instrumentation astronomique utilisée entre 10 THz et 1 000 THz (30 μm à 0,3 μm) est extrêmement sensible aux brouillages ou même à la détérioration des détecteurs par des signaux de forte puissance. Toutefois, la forte directivité de systèmes actifs comme les systèmes de télécommunication utilisant des lasers exploités à des fréquences comprises entre 20 THz et 375 THz (15 μm et 0,8 μm), ainsi que les propriétés de propagation des ondes dans cette gamme de fréquences, génèrent des phénomènes de brouillage jusqu'alors inconnus mais offrent également toute une série de solutions en ce qui concerne l'évitement des brouillages et/ou le partage des bandes de fréquences. Pour étudier les possibilités d'évitement des brouillages et de partage des bandes dans cette gamme de fréquences, il faudra connaître les caractéristiques techniques et opérationnelles des récepteurs astronomiques et des systèmes de télescopes.

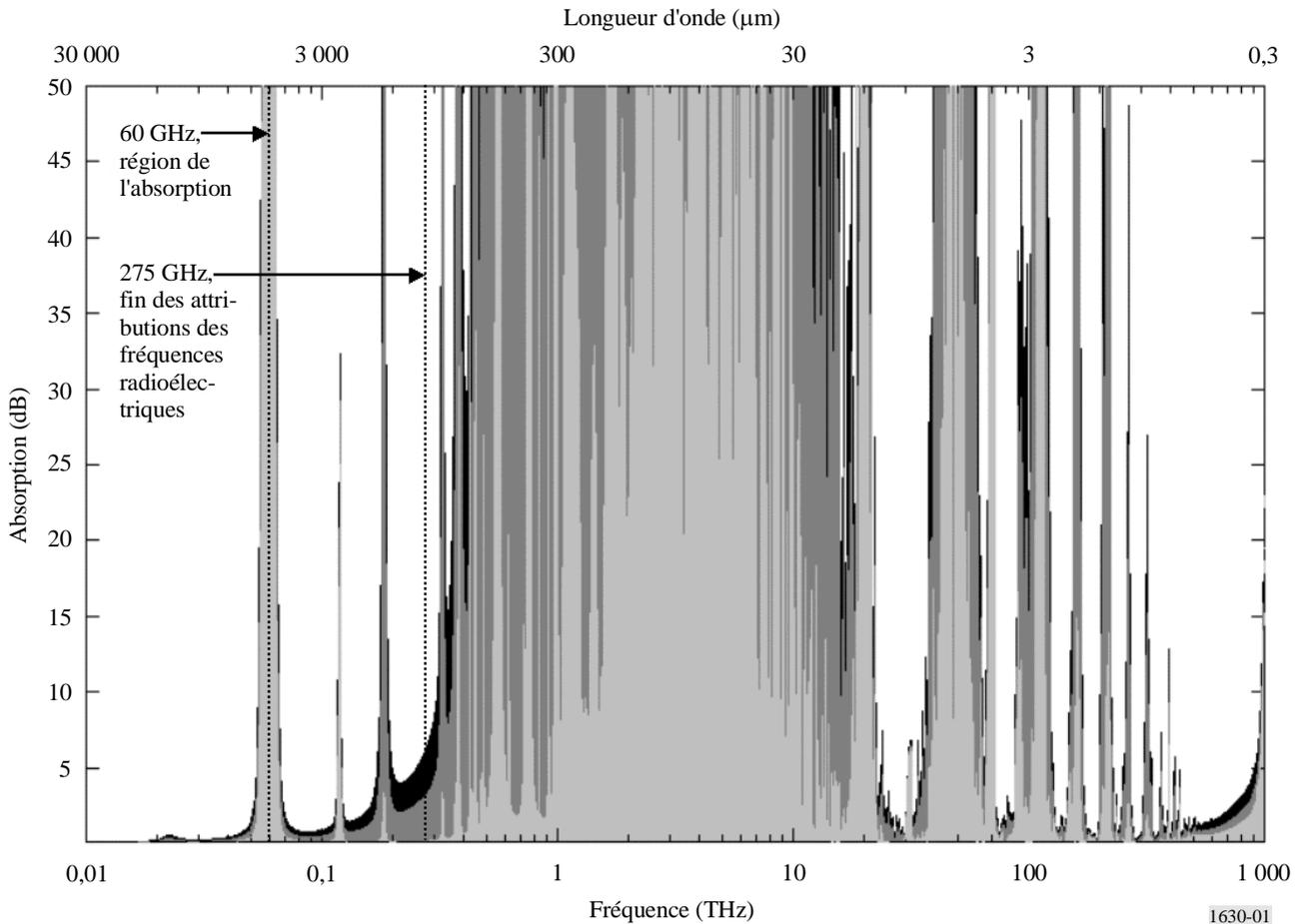
2 Bandes considérées

En raison de contraintes atmosphériques, la majorité des observations astronomiques depuis la Terre, au-dessus de l'actuelle limite supérieure de 1 THz fixée dans le numéro 5.565 du Règlement des radiocommunications, se font entre 100 THz et 1 000 THz approximativement. La Fig. 1 illustre la dépendance en fonction de la fréquence du pouvoir de transmission de l'atmosphère le long de trois trajets zénithaux. La zone ombrée en gris clair représente un site de bonne qualité caractérisé par un air sec et situé à une altitude de 5 km au-dessus du niveau de la mer. La zone en gris foncé correspond à l'absorption atmosphérique supplémentaire qui se produirait pour un site situé à une altitude de 2 km au-dessus du niveau de la mer (Kitt Peak, par exemple). Les zones noires correspondent à l'incidence supplémentaire de l'atmosphère pour un site situé au niveau de la mer. Pour tous les trajets on utilise les profils de température et de pression donnés dans la Recommandation UIT-R P.835. On calcule l'absorption au-dessous de 1 THz à l'aide de la Recommandation UIT-R P.676. La Figure montre clairement que l'atmosphère, à l'exception de certains sites astronomiques choisis, situés à des latitudes élevées, est opaque à l'énergie électromagnétique pour la quasi-totalité des fréquences situées entre 1 THz et 10 THz environ. Au-dessus de 10 THz la transparence de l'atmosphère est favorable aux observations de l'énergie cosmique depuis la surface de la Terre. Au-dessus de 1 000 THz environ, l'atmosphère redevient opaque.

Le pouvoir de transmission de la région spectrale située entre 10 THz et 1 000 THz est illustré en détail dans la Fig. 2 pour les trois mêmes trajets zénithaux. Il se caractérise par une série de fenêtres de visibilité séparées les unes des autres par des régions étroites mais d'intense absorption. La transparence des différentes fenêtres de visibilité est limitée par une fine structure de nombreuses raies d'absorption faibles. Différentes raies d'absorption se produisent en raison de la présence de composants gazeux dans l'atmosphère notamment et la liste n'est pas exhaustive: NH_3 , CO_2 , CO , CH_4 , NO_2 , NO , O_2 , O_3 , SO_2 , H_2O et divers hydrocarbures chlorofluorés. Plusieurs de ces gaz, qui sont importants pour les observations astronomiques entre 10 THz et 1 000 THz ne sont pas actuellement examinés dans les Recommandations UIT-R relatives à la propagation. L'intensité des raies d'absorption dépend généralement de la température et de la pression. L'intensité et la largeur de ces raies étant variables, les bandes présentant un intérêt pour les observations astronomiques optiques depuis la Terre couvrent tout le spectre entre environ 10 THz et 1 000 THz.

FIGURE 1

Absorption (zone ombrée) d'une atmosphère le long d'un trajet vertical



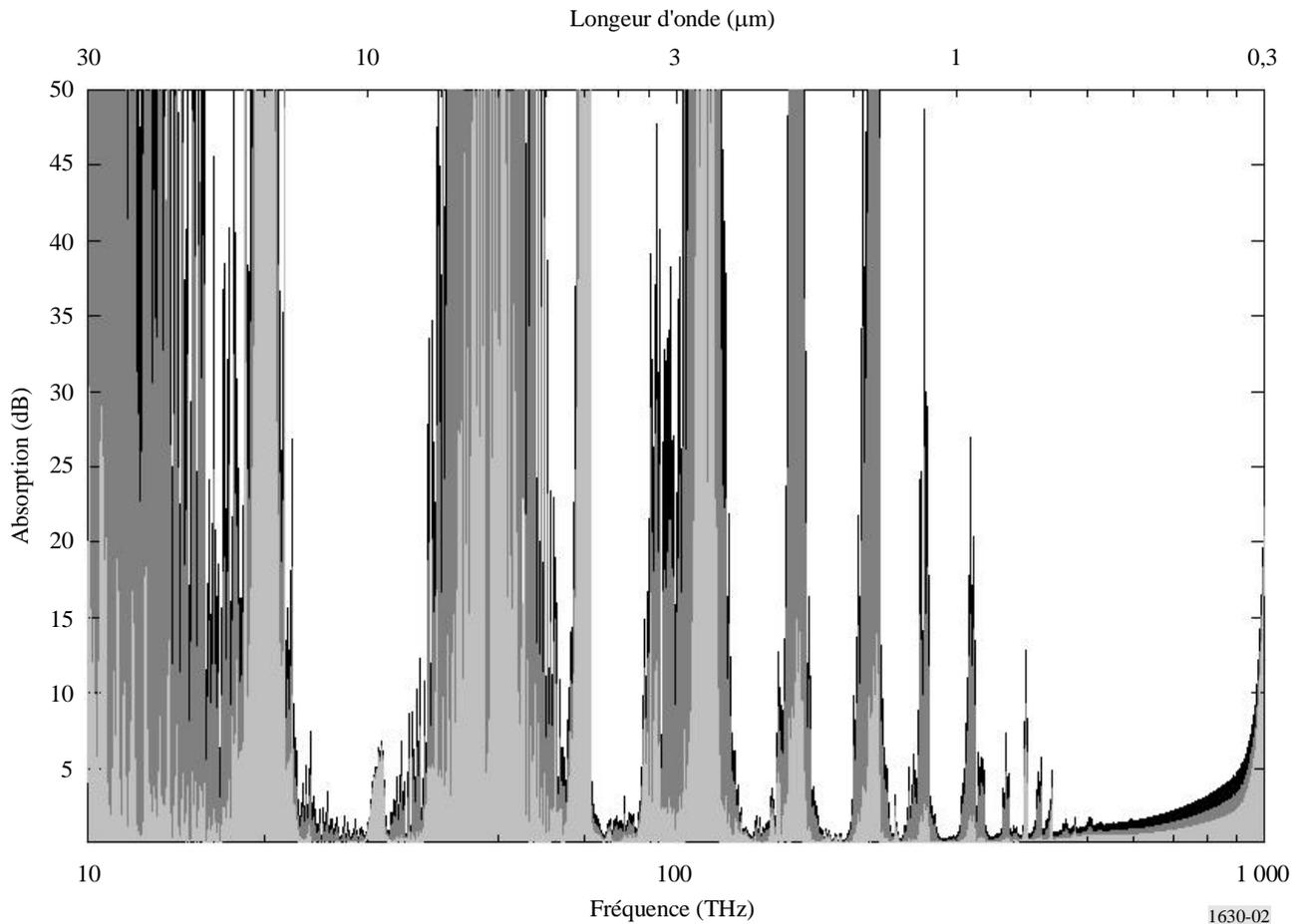
Il est possible d'avoir accès à d'autres bandes de fréquences si on utilise des observatoires aéroportés – sondes ou avions spécialisés pour les observations astronomiques, par exemple – pour avoir un accès plus large à ces fréquences importantes pour la radioastronomie, on utilise des observatoires spatiaux comme le télescope Hubble.

3 Types d'observations

Certaines des observations faites entre 10 THz et 1 000 THz sont analogues à celles qui sont effectuées dans les bandes actuellement attribuées au service de radioastronomie: il s'agit des mesures de la densité spectrale de puissance surfacique du continuum ou des propriétés des raies spectrales (densité spectrale de puissance surfacique des raies, effet Doppler et forme de l'effet Doppler). Une des différences notables entre les observations astronomiques qui sont faites à des fréquences au-dessous de 275 GHz et celles qui sont faites à des fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz est qu'il est beaucoup plus facile d'obtenir des images directes dans la dernière gamme de fréquences, qu'il s'agisse du continuum ou des raies spectrales compte tenu de la sensibilité des réseaux de détecteurs actuels (plusieurs millions de pixels chacun) et des caméras photographiques; la technique de l'imagerie directe est largement utilisée. Les largeurs de bande utilisées sont en règle générale beaucoup plus importantes.

FIGURE 2

Absorption (zone ombrée) au-dessus de 10 THz d'une atmosphère normalisée le long d'un trajet vertical



Plusieurs techniques de mesure permettent de recueillir les données astronomiques entre 10 THz et 1 000 THz. Chaque technique fournit des informations uniques sur le ou les objets mesurés. Les valeurs types utilisées des paramètres comme la largeur de bande, la sensibilité du récepteur, les dimensions du champ observé ou la résolution angulaire dépendent en pratique du type de mesure effectuée.

Les temps d'intégration généralement utilisés varient dans des proportions importantes, de 0,001 s à plusieurs heures, en fonction de la stabilité de l'atmosphère, du type de détecteur utilisé ainsi que des caractéristiques et de l'intensité de l'émission observée. Les multiples mesures effectuées avec de courts temps d'intégration sont souvent enregistrées sous forme numérique puis intégrées ultérieurement pour tirer parti des avantages de sensibilité qu'offre un long temps d'intégration au niveau de la sensibilité.

3.1 Photométrie

La photométrie est le «pendant», dans la gamme des hautes fréquences, des observations du continuum dans les bandes attribuées à la radioastronomie au-dessous de 275 GHz, elle mesure la densité spectrale de puissance surfacique des sources cosmiques.

Les mesures de la densité spectrale de puissance surfacique entre 10 THz et 1 000 THz concernent en général tous les types de galaxies, d'étoiles, d'objets dans le système solaire et de poussières entre ou autour des étoiles dans les objets très divers que l'on trouve dans l'Univers.

La photométrie est une technique utilisée sur l'ensemble de la gamme de fréquences considérée; les bandes de fréquences standard qu'elle utilise sont définies par des filtres placés sur le trajet de la lumière vers le détecteur. Une liste des bandes définies par des filtres large bande couramment utilisées entre 10 et 1 000 THz est donnée dans le Tableau 3. Des exemples des différents types de détecteur utilisés dans les différentes gammes de fréquences sont donnés dans le Tableau 2. Ces détecteurs comprennent: des bolomètres des détecteurs par photoconduction ou des détecteurs photovoltaïques pour les bandes N et Q, des détecteurs InSb pour les bandes J, H, K, L et M et des détecteurs à couplage de charge (CCD, *charge coupled device*) pour les bandes U, B, V, R et I. On utilise également des filtres à bande étroite centrés sur les raies spectrales présentant un intérêt particulier.

Les observations photométriques sont en général étalonnées par comparaison avec des étoiles bien caractérisées.

3.2 Spectroscopie

La spectroscopie est le «pendant» dans la gamme des hautes fréquences des mesures des raies spectrales dans les bandes attribuées à la radioastronomie au-dessous de 275 GHz. L'abondance de raies spectrales entre 10 THz et 1 000 THz, raies dont la majorité proviennent de divers états d'éléments et de molécules qui n'ont pas de raies aux fréquences en dessous de 275 GHz, fait qu'il s'agit là d'une branche importante de l'astronomie et souligne combien il est important d'avoir accès à cette gamme de fréquences.

On effectue des observations des raies spectrales pour obtenir des informations sur, par exemple, la composition, la chimie, les propriétés physiques et la dynamique de corps très divers comme les nuages interstellaires, les différentes galaxies, les groupes et les grappes de galaxies ainsi que sur l'expansion générale de l'Univers et ses déviations locales, sur la composition et les origines des étoiles et sur les champs magnétiques cosmiques.

Le dispositif dispersif le plus largement utilisé pour la spectroscopie dans la gamme des fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz est le réseau de diffraction. Un réseau de diffraction disperse l'énergie entrante en fonction de la fréquence. L'énergie dispersée est en général enregistrée par un détecteur électronique, par exemple une caméra CCD, pour créer un spectrogramme.

A la limite inférieure de cette gamme de fréquences, on utilise des spectromètres analogiques et de plus en plus des spectromètres numériques. Cependant, de tels dispositifs ne sont pas encore largement disponibles sauf dans le cas de récepteurs hétérodynes qui convertissent les signaux reçus à une fréquence inférieure.

Les bandes attribuées à la radioastronomie sont alors examinées pour voir s'il s'y trouve des raies caractéristiques d'éléments particuliers. Dans l'affirmative, on sait que cet élément est présent dans le corps cosmique ou, dans certains cas, dans l'espace entre le corps cosmique et le télescope récepteur. La spectroscopie contribue beaucoup également à l'étude du déplacement et de la dynamique des corps astronomiques. En mesurant le décalage Doppler des raies émises par des étoiles ou des gaz interstellaires, par exemple dans les galaxies, on peut déterminer le déplacement radial le long du trajet en visibilité directe, en vue notamment d'études de leur vitesse dans l'espace et de la dynamique interne d'objets allongés comme les galaxies ou les nuages de gaz interstellaires.

La spectroscopie peut être réalisée à plusieurs niveaux de résolution spectrale. La résolution la plus grossière correspond à une forme de photométrie que l'on obtient en utilisant un spectrographe, où le spectre est décomposé en un petit nombre de bandes de fréquences dans le seul but de donner une indication de la répartition globale de l'énergie spectrale. Avec une spectroscopie à résolution moyenne/élevée, les différentes raies et bandes moléculaires peuvent être examinées plus en détail.

Avec les progrès faits en ce qui concerne la sensibilité des réseaux de détecteurs et la construction de très grands télescopes, il est possible de faire des études spectroscopiques de corps de plus en plus faiblement lumineux et d'étudier avec un niveau de détail jamais atteint jusqu'ici les spectres de corps plus lumineux.

3.3 Imagerie

Par rapport aux dispositifs d'imagerie directe exploités entre 10 THz et 1 000 THz, les actuels réseaux locaux à plusieurs éléments des récepteurs de radioastronomie exploités au-dessous de 275 GHz sont plutôt limités pour ce qui est du nombre d'éléments et de la résolution spatiale.

Pour les fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz, il est possible d'utiliser des réseaux locaux à plusieurs éléments ce qui fait qu'il est plus courant d'obtenir des images directes. Ces réseaux locaux peuvent être des CCD qui fournissent une carte numérique de brillance par pixel. Cette technique présente un certain nombre d'avantages déterminants par rapport à la photographie classique: par intégration en effet, on peut reconstituer une pause longue à partir d'un grand nombre de pauses courtes. Il est ainsi possible d'éliminer les pixels et les images dégradés par le brouillage et d'appliquer divers algorithmes d'analyse et d'amélioration de l'image. Les CCD actuellement disponibles pour les applications astronomiques consistent en des rétines de $\sim 2\,000$ pixels \times 2 000, dont un certain nombre peuvent être installées dans le plan focal d'un télescope pour créer des dispositifs d'imagerie numérique avec un champ de visibilité encore plus grand.

Les techniques photographiques introduites en astronomie peu après l'invention de la plaque photographique sont aujourd'hui essentiellement limitées aux observations qui nécessitent un nombre encore plus grand de pixels (plus grand champ angulaire) que l'on peut facilement obtenir en utilisant des caméras CCD étant donné que les plaques photographiques les plus grandes actuellement utilisées sont encore beaucoup plus grandes que les plus grandes caméras CCD opérationnelles.

3.4 Interférométrie

Aux fréquences inférieures à 275 GHz, les images radio sont en général produites par mesure des différentes composantes de Fourier de la distribution de brillance, lesquelles sont ensuite traitées pour constituer une image finale. En général, en raison de diverses imperfections d'imagerie associées à l'ouverture synthétique, on n'obtient pas la représentation parfaite souhaitée. En raison des complexités dues aux variations rapides des influences atmosphériques dans la gamme des fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz, l'interférométrie est une technique tout à fait nouvelle dans cette gamme. En général, la résolution angulaire d'un télescope terrestre, fonctionnant entre 10 THz et 1 000 THz, même celle des télescopes ayant des miroirs de 10 m de diamètre qui sont actuellement en service, est limitée en pratique par la turbulence atmosphérique, en particulier entre 100 THz et 1 000 THz.

Les grandes résolutions angulaires nécessaires pour étudier certains corps comme les étoiles ou les galaxies actives entre 10 THz et 1 000 THz ont conduit à utiliser de plus en plus l'interférométrie. Cette technique est tout à fait nouvelle mais de gros efforts sont faits sur le plan technique de sorte que l'interférométrie deviendra vraisemblablement une technique aussi importante à ces fréquences que dans les bandes actuellement attribuées au service de radioastronomie. La plupart des grands télescopes fonctionnant dans cette gamme de fréquences utilisent actuellement l'interférométrie pour les observations.

En combinant de façon cohérente les signaux de deux ou plus de deux télescopes à une certaine distance l'un de l'autre, on peut augmenter sensiblement la résolution angulaire et réduire de façon significative la turbulence atmosphérique. On peut utiliser des interféromètres optiques pour mesurer directement le diamètre d'un corps cosmique. De nombreux télescopes largement espacés les uns des autres peuvent effectuer de l'interférométrie sur de grandes lignes de base pour obtenir des mesures avec une précision aussi fine que $2,8 \times 10^{-8}$ degrés.

Pour effectuer certaines mesures d'interférométrie au voisinage de 30 THz (10 μm) on utilise une détection hétérodyne. L'utilisation de techniques cohérentes autorise une largeur de bande beaucoup plus étroite, ce qui peut, dans certains cas particuliers, se traduire par une amélioration de la sensibilité. La décomposition de l'énergie mesurée entre plusieurs télescopes ne permet pas de réduire le rapport S/N du système hétérodyne comme ce serait le cas avec un système de détection directe. En général, les interféromètres hétérodynes effectuent des mesures sur des bandes de plusieurs GHz de large. Cette largeur de bande est beaucoup plus étroite que pour d'autres types de mesure.

4 Caractéristiques techniques de certains détecteurs astronomiques

Les caractéristiques des détecteurs utilisés pour les observations astronomiques entre 10 THz et 1 000 THz sont souvent spécifiées dans des unités de mesure qui diffèrent de celles utilisées pour les récepteurs de radioastronomie fonctionnant au-dessous de 275 GHz. Ces différences s'expliquent par des raisons pratiques et aussi par le fait qu'on utilise des technologies uniques pour la détection de l'énergie dans les bandes radioélectriques et les bandes optiques. Les considérations pratiques, par exemple les caractéristiques souhaitables de l'emplacement des sites et les sources d'étalonnage peuvent elles aussi varier entre les deux gammes spectrales susmentionnées. Compte tenu de ces différences il est souvent difficile d'appliquer la terminologie normalisée concernant la radioastronomie à l'astronomie entre 10 THz et 1 000 THz. Par ailleurs, les unités utilisées habituellement pour décrire des paramètres physiques analogues peuvent différer d'une gamme de fréquences à l'autre. Le Tableau 1 compare les unités généralement utilisées en radioastronomie et en astronomie optique.

TABLEAU 1

Comparaison des unités généralement utilisées pour décrire les paramètres radio astronomique et d'optique astronomique

Paramètre	Unités utilisées en radioastronomie au-dessous de 275 GHz	Unités utilisées en astronomie entre 10 THz et 1 000THz	Conversion
Fréquence	kHz, MHz, GHz, THz	cm^{-1}	$1/\text{cm} \sim 30 \text{ GHz}$
Longueur d'onde	mm, cm, m	μm , nm, Å	$1 \text{ m} = 10^6 \mu\text{m} = 10^9 \text{ nm} = 10^{10} \text{ Å}$
Densité spectrale de puissance surfacique	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$, $\text{dB}(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}))$, Jy	Jy, magnitudes	$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$

4.1 Champ de visibilité et résolution angulaire

Les dimensions du champ de visibilité sont liées aux dimensions physiques du détecteur et à la distance focale du télescope. Elles peuvent être déterminées par l'équation:

$$\theta = \frac{180d}{\pi F} \quad (1)$$

où:

θ : champ de visibilité (degrés)

d : diamètre du détecteur (m)

F : distance focale du télescope (m).

Dans la pratique, le champ de visibilité d'un télescope peut être réduit à l'aide d'un diaphragme, pour différentes raisons (par exemple qualité imparfaite de l'image dans les parties les plus à l'extérieur du champ de visibilité).

La technologie des détecteurs progresse et permet aujourd'hui aux astronomes d'observer des parties de plus en plus grandes du ciel avec une meilleure résolution angulaire. Ces améliorations sont en général obtenues grâce à l'utilisation de réseaux de détecteurs caractérisés par une surface utile plus grande et des pixels plus petits. Le champ de visibilité des réseaux de détecteurs peut fréquemment aller jusqu'à $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ mais, en fonction de l'instrumentation et du télescope son diamètre peut être aussi petit que 10^{-4} degrés. Les champs de visibilité les plus grands actuellement disponibles sont de l'ordre de plusieurs degrés carrés. On peut utiliser plusieurs détecteurs avec un seul et même télescope pour observer l'énergie provenant d'une source unique. Par ailleurs, il est possible d'interchanger des détecteurs en l'espace de quelques minutes. Par conséquent il n'y a pas lieu de définir un seul champ de visibilité pour un télescope particulier.

La résolution angulaire est un autre paramètre utile pour les astronomes. La résolution angulaire d'un télescope permet de mesurer sa capacité d'identifier dans son champ de visibilité des objets distincts proches les uns des autres. La résolution angulaire maximale que l'on peut en théorie atteindre pour une ouverture donnée, dans l'hypothèse d'un fonctionnement parfait de l'instrumentation et sans les effets négatifs de l'atmosphère de la Terre est donnée par la formule:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{3,974D} = \frac{75,49}{fD} \quad (2)$$

où:

$\Delta\theta$: résolution angulaire (d'arc)

f : fréquence (THz)

λ : longueur d'onde (μm)

D : diamètre de l'ouverture primaire (m).

En théorie, des résolutions angulaires de 10^{-5} degrés sont courantes pour une ouverture unique.

Dans la pratique toutefois, la résolution angulaire d'un télescope est généralement limitée par la turbulence atmosphérique. Sur les meilleurs sites d'observation terrestres, on obtient couramment des résolutions angulaires d'environ 0,6 d'arc sans utiliser l'optique active ou l'optique adaptative (voir § 4.4) pour stabiliser l'image alors que la résolution angulaire que l'on peut théoriquement atteindre pour les plus grands télescopes de 10 m de diamètre fonctionnant aux longueurs d'onde optiques (à une fréquence de 600 THz) n'est que de 10^{-2} d'arc. En utilisant une technique appelée interférométrie (voir § 3.4) la résolution angulaire des mesures réalisées est de l'ordre de 10^{-5} d'arc.

4.2 Sensibilité

Le gain du faisceau principal d'une antenne de radioastronomie fonctionnant entre 10 THz et 1 000 THz peut être calculé à l'aide des mêmes équations que celles utilisées pour les antennes fonctionnant dans la région des GHz. La présence d'écrans dans les télescopes astronomiques ramène les gains dans les lobes latéraux et les lobes arrière à des niveaux négligeables.

Les astronomes disposent de plusieurs techniques pour détecter l'énergie dans les gammes de fréquences comprises entre 10 THz et 1 000 THz. Le Tableau 2 donne une liste des gains et des rendements quantiques fréquemment utilisés pour beaucoup de détecteurs et de réseaux optiques courants.

TABLEAU 2

Paramètres de certains des réseaux de détecteurs et de certains détecteurs utilisés dans les bandes optiques

Dispositif	Gamme de fréquences (THz)	Dimension typique (10^{-3} m)	Type η	Type G	Matériel
Photodiode à semi-conducteur	10 à 2 000	0,1-250	0,7-1	1	Si, Ge, InSb, HgCdTe
Photodiode à avalanche	300 à 2 000	0,1 (typique)-250	0,7-1	10^6	Si
Détecteur de bande d'impuretés bloquée	1 à 10	5-15	0,1-0,7	1	Si:As, Si:Sb, Si:Ga, Ge:Ga
Tube photomultiplicateur	300 à 1 000	5-25	0,1-0,5	10^6 - 10^8	Na ₂ KSb:Cs, GaAs:Cs-O, Cs ₃ Sb
Photoconducteur extrinsèque	1 à 10	10-50	0,05-0,4	0,1-10	Si:As, Ge:Be, Ge:Ga, Ge:Sb
Détecteur hétérodyne	0 à 50	Amplification et détection électronique			
CCD	60 à 2 000	5-8	0,8-0,9	1	Si, InSb

Ainsi, chacun de ces types de détecteurs a une sensibilité unique en fonction de la fréquence et une efficacité pour détecter l'énergie. Ils fonctionnent en transformant l'énergie reçue en un courant électrique selon la formule:

$$I_R = \frac{\eta G e P_R}{h \nu} \quad (3)$$

où:

I_R : courant induit dans le détecteur (A)

η : rendement quantique

G : gain

e : charge de l'électron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

P_R : Puissance reçue au niveau du détecteur (W)

h : constante de Plank (J·s)

ν : fréquence (Hz).

La valeur du niveau de bruit ou du courant d'obscurité dans un détecteur varie beaucoup mais elle est généralement inférieure à dix électrons/s. Cette valeur pourrait être beaucoup plus grande pour certains systèmes mais la valeur de 10 électrons/s est représentative d'instruments et de mesures de qualité. La quantité de courant parasite dans le détecteur est donnée par:

$$I_{dark} = 1,6 \times 10^{-19} r \quad (4)$$

où:

I_{dark} : courant d'obscurité (A)

r : flux d'électrons de courant d'obscurité passant à travers le détecteur (électrons/s).

4.3 Emplacement des télescopes

Des télescopes astronomiques fonctionnant entre 10 THz et 1 000 THz sont implantés dans le monde entier. Les sites où sont implantés les télescopes les plus gros et les plus sensibles sont choisis essentiellement pour leur stabilité atmosphérique, leur faible teneur en vapeur d'eau et leur éloignement de sources d'énergie perturbatrices dans les bandes considérées (voir le § 2). Les caractéristiques optimales sont généralement les suivantes: altitude élevée, souvent au moins 2 km au-dessus du niveau de la mer, éloignement des zones urbaines et conditions climatiques locales arides. L'altitude élevée est très importante pour limiter les effets de la turbulence associés à la «couche limite» atmosphérique. Le fait de minimiser l'épaisseur des couches atmosphériques entre les télescopes et les corps cosmiques à étudier maximise les bandes spectrales effectivement disponibles (voir les Fig. 1 et 2). Les sites de grande qualité sont peu nombreux dans le monde de sorte qu'il peut y avoir jusqu'à 20 télescopes implantés sur le même site. Les critères préférés des sites pour les observations de radioastronomie effectuées entre 275 GHz et 1 000 GHz et pour celles effectuées entre 10 THz et 1 000 THz sont très semblables de sorte qu'il y a à la fois des radiotélescopes et des télescopes optiques implantés sur un grand nombre de sites d'observation de grande qualité (le site de Mauna Kea à Hawaii ou le site de La Silla au Chili). Certains télescopes astronomiques évolués qui sont actuellement en cours d'élaboration ou qui sont exploités sont situés soit à bord d'aéronefs soit dans l'espace. Les astronomes amateurs préfèrent les sites à des altitudes élevées mais ils peuvent effectuer leurs observations n'importe où sur Terre à condition d'avoir une bonne visibilité du ciel.

4.4 Compensation de la turbulence atmosphérique

La résolution angulaire des télescopes à ouverture unique de plus de 1 m de diamètre dotés de miroirs ou de lentilles fixes est limitée dans la pratique par la turbulence atmosphérique, même sur les meilleurs sites d'observation en altitude. Il est toutefois possible d'améliorer la résolution angulaire des télescopes en recourant à l'optique adaptative ou à l'optique active. Dans certaines conditions, l'amélioration permet au télescope d'approcher la limite de diffraction théorique (voir l'équation (2)).

4.4.1 Optique active

Les déviations dues à la gravitation et les gradients thermiques dans le champ d'un miroir peuvent conduire à des mesures imparfaites. L'optique active est une technique destinée à compenser ces distorsions lentes, variant en fonction du temps et cette technique est régulièrement intégrée dans les télescopes astronomiques d'au moins 4 m de diamètre.

4.4.2 Optique adaptative

L'optique adaptative est une technique destinée à compenser les fluctuations rapides, variant en fonction du temps que l'on observe dans l'atmosphère et qui faussent les observations astronomiques. La fréquence des fluctuations que corrige un système d'optique adaptative peut aller jusqu'à 100 Hz. Il est possible de corriger des erreurs de phase dans l'onde incidente allant d'environ 10^{-8} à 10^{-6} m.

Une étoile guide laser est une méthode couramment utilisée en optique adaptative pour corriger les aberrations atmosphériques. On crée une étoile guide laser en propageant un faisceau laser depuis le sol le long d'un trajet situé dans le champ de visibilité du télescope et en mesurant l'énergie réfléchi. Les fluctuations mesurées de l'étoile guide laser dues à l'atmosphère peuvent ensuite être utilisées pour compenser les distorsions atmosphériques sur des cibles situées ailleurs dans le champ de visibilité du télescope. Ces fluctuations ne sont utiles en général que pour corriger des distorsions atmosphériques présentant un espacement angulaire faible par rapport à l'étoile guide laser. Par conséquent on utilise parfois plusieurs lasers pour effectuer des corrections sur un grand champ de visibilité.

L'étoile guide laser la plus largement utilisée est dirigée sur la couche sodium dans la haute mésosphère à environ 90 km au-dessus de la surface de la Terre. Ces lasers sont accordés sur une fréquence de 509,3 THz ($0,589 \mu\text{m}$) ce qui provoque la fluorescence des atomes de sodium. Les lasers utilisés pour générer des étoiles guides sodium émettent généralement des puissances moyennes de 10 à 25 W mais des puissances allant jusqu'à 1 kW sont techniquement possibles. L'optique adaptative basée sur les étoiles guides sodium est généralement associée aux observations astronomiques effectuées aux fréquences au-dessous de 400 THz (longueurs d'onde de plus de $0,75 \mu\text{m}$). Une autre forme d'optique adaptative appelée tomographie atmosphérique utilise des lasers sur une gamme comprise entre 833,3 THz et 857,1 THz (longueurs d'onde comprises entre $0,35 \mu\text{m}$ et $0,36 \mu\text{m}$). La tomographie atmosphérique est basée sur la diffusion de Rayleigh et les mesures se font à des altitudes très variées qui sont généralement situées au-dessous de la couche sodium. Les puissances requises sont comprises entre environ 50 et 250 W.

5 Caractéristiques techniques des observatoires

Les caractéristiques techniques et opérationnelles des observatoires astronomiques fonctionnant entre 10 THz et 1000 THz ne sont pas nécessairement les mêmes que celles des observatoires de radioastronomie fonctionnant au-dessous de 275 GHz. Il existe toutefois certaines similarités.

5.1 Horaires de fonctionnement types

Les tranches horaires pendant lesquelles il est possible de faire des observations astronomiques depuis la Terre entre 10 THz et 1000 THz, sont très limitées par les conditions atmosphériques et la position du soleil. Pour la plupart des observations astronomiques effectuées dans cette gamme de fréquences, il faut des conditions atmosphériques favorables (ciel clair) et il faut aussi que le soleil soit absent du ciel visible car sa présence fait augmenter considérablement la luminosité du ciel, ce qui rend indétectables les sources faiblement lumineuses. Le lever et le coucher du soleil induisent des variations de température dans les couches de l'atmosphère, ce qui crée des conditions atmosphériques défavorables et turbulentes pour les observations astronomiques. Le degré d'instabilité atmosphérique dépend beaucoup des saisons et des effets microclimatiques, de sorte que ce paramètre varie en fonction du site.

Par conséquent, la plupart mais pas la totalité des observations astronomiques dans la gamme de fréquences considérée se font après le crépuscule local et avant l'aube locale. Pendant le crépuscule ou pendant l'aube on procède à des observations d'étalonnage en pointant le télescope vers certains

points du ciel. A titre d'exemple d'observations astronomiques courantes effectuées pendant le jour on peut citer les observations du soleil dans l'ensemble de la gamme de fréquences considérée ainsi que les observations de sources relativement lumineuses autres que le soleil dans la gamme de fréquences comprise entre 10 THz et 30 THz. Certaines observations d'étalonnage peuvent également être effectuées dans le ciel pendant le jour.

5.2 Vitesses de précession des télescopes

La vitesse angulaire d'un télescope astronomique qui poursuit un corps céleste dans le ciel est généralement égale à la vitesse de rotation de la Terre soit environ 0,25 degré/min ($\approx 4,167 \times 10^{-3}$ degrés/s) ou proche de cette valeur pour les observations de corps dans le système solaire (les corps les plus rapides qui sont poursuivis étant les astéroïdes à proximité de la Terre). Les télescopes peuvent souvent bouger beaucoup plus rapidement lorsqu'ils se repositionnent pour observer un autre objet. Toutefois, en cas de repositionnement, la précision de pointage se détériore au point de ne plus pouvoir obtenir de données utiles.

Annexe 2

Pour calculer la gravité des brouillages causés à un récepteur d'astronomie optique au sol il convient d'utiliser les paramètres indiqués dans les Tableaux 1, 2 et 4 qui sont représentatifs des systèmes existants. Les paramètres des télescopes astronomiques et ceux des détecteurs, ainsi que les bandes de fréquences utilisables sont données dans des tableaux distincts car les télescopes astronomiques sont indépendants des détecteurs qui leur sont associés.

Les noms associés aux filtres spectraux ont été adoptés par les astronomes et sont couramment utilisés. Les fréquences centrales de chaque filtre sont grossièrement corrélées aux fenêtres de visibilité atmosphérique et sont présentées dans le Tableau 3.

TABLEAU 3

Filtres large bande les plus fréquemment utilisés entre 10 THz et 1 000 THz

Filtre	Q	N	M	L'	L	K	H
Fréquence centrale (THz)	15	30	63	79	86	136	180
Longueur d'onde (μm)	20,25	10,1	4,80	3,80	3,50	2,20	1,65
Largeur de bande (THz)	15,2	18,2	15,9	14,7	17,3	30,1	33,3
(μm)	6,50	5,70	1,20	0,70	0,70	0,48	0,30
Filtre	J	I _r	I _s	R	V	B	U
Fréquence centrale (THz)	240	330	370	430	560	700	830
Longueur d'onde (μm)	1,25	0,90	0,80	0,70	0,54	0,43	0,36
Largeur de bande (THz)	74,7	90,5	115,1	138,1	93,2	164,5	163,6
(μm)	0,38	0,24	0,24	0,22	0,09	0,10	0,07

Les dimensions et les distances focales des télescopes astronomiques varient beaucoup. On trouvera dans le Tableau 4 une liste des paramètres à utiliser pour évaluer les brouillages causés à ces télescopes.

TABLEAU 4

Paramètres de certains des grands systèmes d'astronomie terrestres fonctionnant entre 10 THz et 1 000 THz

Diamètre de l'ouverture (m)	Télescope	Emplacement	Distance focale (m)	Latitude (°N)	Longitude (°O)	Altitude (m)
10	Keck I	Mauna Kea, HI, Etats-Unis d'Amérique	17,5 (f/1,75)	19,83	155,47	4 123
	Keck II					
9,2	Hobby-Eberly Telescope (HET)	Mt. Fowlkes, TX, Etats-Unis d'Amérique	13,08 (f/1,4)	30,67	104,02	2 072
8,3	Subaru	Mauna Kea, HI, Etats-Unis d'Amérique	15 (f/1,8)	19,83	155,47	4 100
8,2 × 4	Very Large Telescope	Cerro Paranal, Chili	14,8 (f/1,8)	-24,63	70,40	2 635
8,0	Gemini North	Mauna Kea, HI, Etats-Unis d'Amérique	129,6 (f/16,2)	19,83	155,47	4 100
	Gemini South	Cerro Pachon, Chili	129,6 (f/16,2)	-30,33	70,98	2 737
6,5	Multi-Mirror Telescope (MMT)	Mt. Hopkins, AZ, Etats-Unis d'Amérique	8,1 (f/1,25)	31,68	110,88	2 600
	Magellan I	La Serena, Chili	8,1 (f/1,25)	-29,00	70,71	2 282
6,0	Bolshoi Azimuthal Telescope (BTA)	Zelenschuskaya, Fédération de Russie	24(f/4,0)	43,39	41,26	2 070
5,0	Hale	Palomar Mt, CA, Etats-Unis d'Amérique	16,5 (f/3,3)	33,35	116,87	1 900
4,2	William Herschel Telescope (WHT)	Roque de los Muchachos, Espagne	10,5(f/2,5)	28,45	17,52	2 350
4,0	Victor M. Blanco	Cerro Tololo, Chili	11,5 (f/2,9)	-30,17	70,82	2 200
4,0	Mayall	Kitt Peak, AZ, Etats-Unis d'Amérique	10,3 (f/2,7)	31,95	111,62	2 100
3,9	Anglo-Australian Telescope (AAT)	Siding Springs, Australie	12,7(f/3,3)	-31,28	210,93	1 164

TABLEAU 4 (*fin*)

Diamètre de l'ouverture (m)	Télescope	Emplacement	Distance focale (m)	Latitude (°N)	Longitude (°O)	Altitude (m)
3,8	United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT)	Mauna Kea, HI, Etats-Unis d'Amérique	9,5(f/2,5)	19,49	155,28	4 194
3,6	ESO 3.6m	La Silla, Chili	8,1(f/2,2)	-29,15	70,44	2 400
	Canada-France-Hawaii (CFHT)	Mauna Kea, HI, Etats-Unis, d'Amérique	15,1 (f/4,2)	19,83	155,47	4 200
	Telescopio Nazionale Galileo (TNG)	Roque de los Muchachos, Espagne	38,5(f/11,0)	28,45	17,52	2 350
3,5	WIYN	Kitt Peak, AZ, Etats-Unis d'Amérique	22 (f/6,3)	31,95	111,62	2 100
	ARC	Apache Point, NM, Etats-Unis d'Amérique	6,1 (f/1,75)	32,78	105,82	2 788
	Calar Alto 3,5 m	Calar Alto, Espagne	12,2(f/3,5)	37,22	2,55	2 168
3,0	Shane	Mt. Hamilton, CA, Etats-Unis d'Amérique	15 (f/5)	37,35	121,63	1 300
	NASA IRTF	Mauna Kea, HI, Etats-Unis d'Amérique	7,6 (f/2,3)	19,83	155,47	4 160
	NODO	Cloudcroft, NM, Etats-Unis d'Amérique	4,5 (f/1,5)	32,98	105,73	2 758

NOTE 1 – La gamme spectrale observable de la plupart des mesures est limitée par le détecteur. La plupart des télescopes mais pas tous peuvent effectuer des observations avec des degrés de réussite divers dans toutes les fenêtres de visibilité atmosphériques.

