

Sensibilité spectrale absolue

par Jeanne-Marie Coutin, Bernard Rougié & Guillaume Ged.

Qu'est ce que la sensibilité spectrale absolue d'un détecteur?

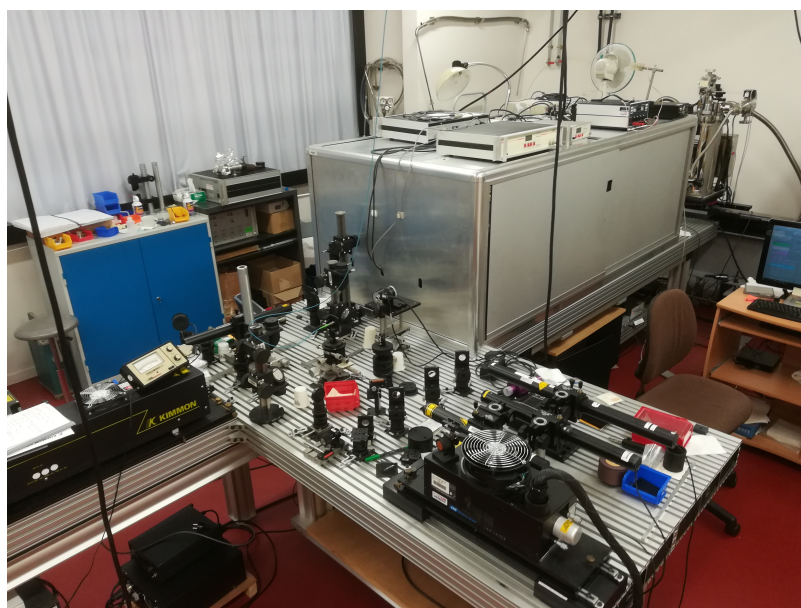
La sensibilité spectrale est la propriété des détecteurs permettant de relier le signal qu'il délivre à la puissance qu'il reçoit. Elle s'exprime donc en ampère par watt ($A \cdot W^{-1}$). Elle est fonction de la longueur d'onde **Lambda** du rayonnement utilisé, on la note **S(Lambda)**. La stratégie utilisée par notre laboratoire est de caractériser de façon absolue la **sensibilité spectrale primaire** des détecteurs à quelques longueurs d'onde discrètes, générées par des lasers. Nous déterminons ensuite la **sensibilité spectrale relative** de ces détecteurs sur des bandes spectrales plus larges en utilisant des sources continues et un monochromateur pour la sélection spectrale.

Cette page décrit la **mesure absolue de la sensibilité des détecteurs par comparaison de ceux-ci au radiomètre cryogénique**, avec une incertitude relative de quelques 10^{-5} .

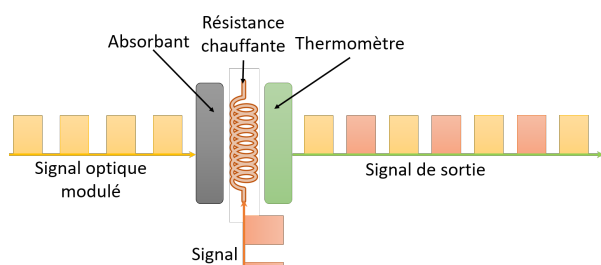
Le radiomètre cryogénique : Point de départ de la traçabilité radiométrique française.

Le radiomètre cryogénique permet l'étalonnage de détecteurs à quelques longueurs d'onde lasers du domaine visible. Les détecteurs étalonnés directement par rapport à cette référence sont utilisés ensuite comme références secondaires ou de transfert sur les autres bancs de mesure. Ce sont, le plus souvent possible, des **détecteurs pièges** ou des détecteurs présentant les meilleures caractéristiques possibles en termes de stabilité, d'homogénéité spatiale, de linéarité.

Le montage est visible sur la photo à droite. Au premier plan se trouvent les différents faisceaux lasers, à l'intérieur de la boîte au second plan sont effectuées les mises en forme des faisceaux. Le radiomètre cryogénique est visible en arrière-plan à la sortie de la boîte.



Principe de la substitution électrique



Le radiomètre cryogénique est un détecteur "à substitution électrique". Son principe repose sur la comparaison directe de la puissance transportée par le rayonnement à une puissance électrique dissipée par effet Joule dans une résistance.

Les radiomètres à substitution électrique sont légion. Ils ne sont pas tous cryogéniques et peuvent fonctionner à des températures moins extrêmes. Les mesures qu'ils délivrent nécessitent cependant

Bilan d'incertitude d'un radiomètre à substitution électrique classique

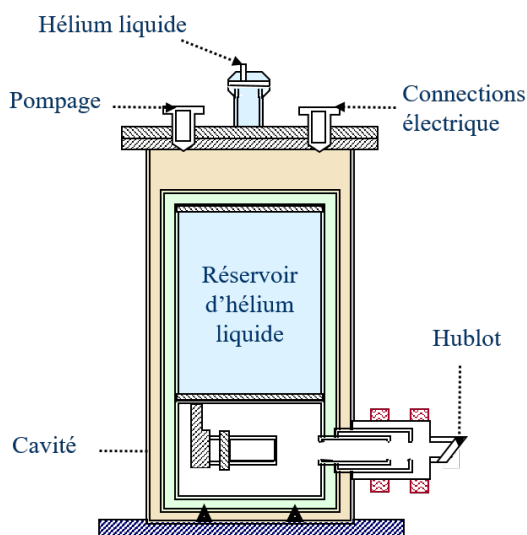
Correction	Coefficient	Incetitude-type relative
	Facteur de réflexion	0,9943 5×10^{-4}
	Uniformité spatiale	1,0018 1×10^{-3}
	Durée d'impulsion	0,9986 5×10^{-4}
	Échauffement des fils	1,0004 2×10^{-4}
	Résistance thermique	0,9970 $1,5 \times 10^{-3}$
	Circuit de mesure	1,0000 1×10^{-4}
	Mesure de puissance	- 1×10^{-4}
	Correction globale	0,9931 2×10^{-3}

La part la plus élevée de ce bilan d'incertitude revient à la résistance thermique du capteur. Ce dernier doit être capable de mesurer un échauffement du fait du flux optique incident, de revenir à température rapidement avant de subir un autre échauffement du fait du flux électrique de substitution et de revenir à température tout aussi rapidement.

Pourquoi le radiomètre est-il cryogénique ?

Aux très basses températures du domaine cryogénique ($\sim 4,2$ K), le cuivre constituant l'élément sensible présente des propriétés physiques optimales pour la mesure. Les échanges de chaleur se font avec une **résistance thermique extrêmement faible**. Ceci implique des pertes minimales dans l'environnement de mesure, améliorant ainsi l'exactitude de cette dernière.

Structure de l'instrument :



Le radiomètre cryogénique effectue une mesure du rayonnement parvenant dans une cavité refroidie à la température de l'hélium liquide (4,2 K). Dans un premier temps, le rayonnement incident des sources lasers provoque un échauffement de la cavité, mesuré avec un thermomètre. La cavité ne reçoit plus le faisceau laser et est chauffée au moyen d'une résistance à un niveau égalant celui du rayonnement subi précédemment.

Connaissant la puissance électrique injectée dans le chauffage de la cavité, il est possible de connaître la puissance du rayonnement incident. Il est possible à l'heure actuelle de mesurer des puissances entre 100 nW et 1 mW

Quelle domaine spectral couvre t'on ?

Plusieurs sources lasers sont utilisées avec le radiomètre cryogénique. Le montage se décompose en trois voies de mesure,

correspondants aux trois domaines spectraux couverts : ultraviolet, visible et infrarouge.

Domaine ultraviolet :

Laser YAG quadruplé : 266 nm
Laser HeCd : 325 nm

Domaine visible :

Laser accordable à argon ionisé : huit longueurs d'onde entre 454 nm et 514 nm.

- Laser HeNe : 543 nm
- Laser HeNe : 612nm
- Laser HeNe : 633 nm

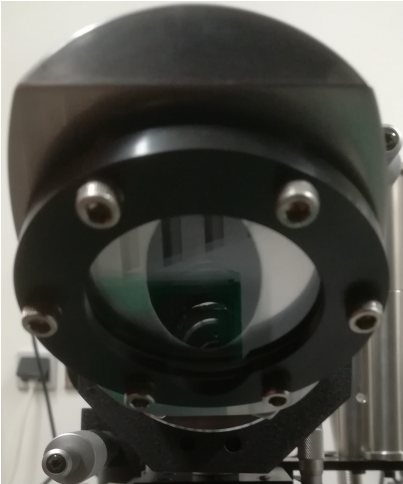
Domaine infrarouge :

- Laser Ti:Saphir : 800 nm
- Laser HeNe : 1150 nm
- Laser HeNe : 1523 nm

Un point critique de l'instrument : la transmission de son hublot.

Le cryostat du radiomètre cryogénique est fermé par un hublot de silice. Pour minimiser les pertes par réflexion, ce hublot est ajusté à l'incidence de Brewster, et l'emploi de faisceaux lasers polarisés permet d'avoir une transmission très voisine de 1. Cependant cette transmission peut-être source d'erreur importante qui limite l'exactitude des mesures ; elle doit donc être connue avec une incertitude la plus faible possible.

Le constructeur du radiomètre cryogénique fournit la valeur du facteur de transmission à la longueur d'onde unique de 633 nm : elle est de 0,999 763 avec une incertitude type de 0,000 031. Il est indispensable de déterminer la valeur de ce facteur aux autres longueurs d'ondes utilisées avec le radiomètre.



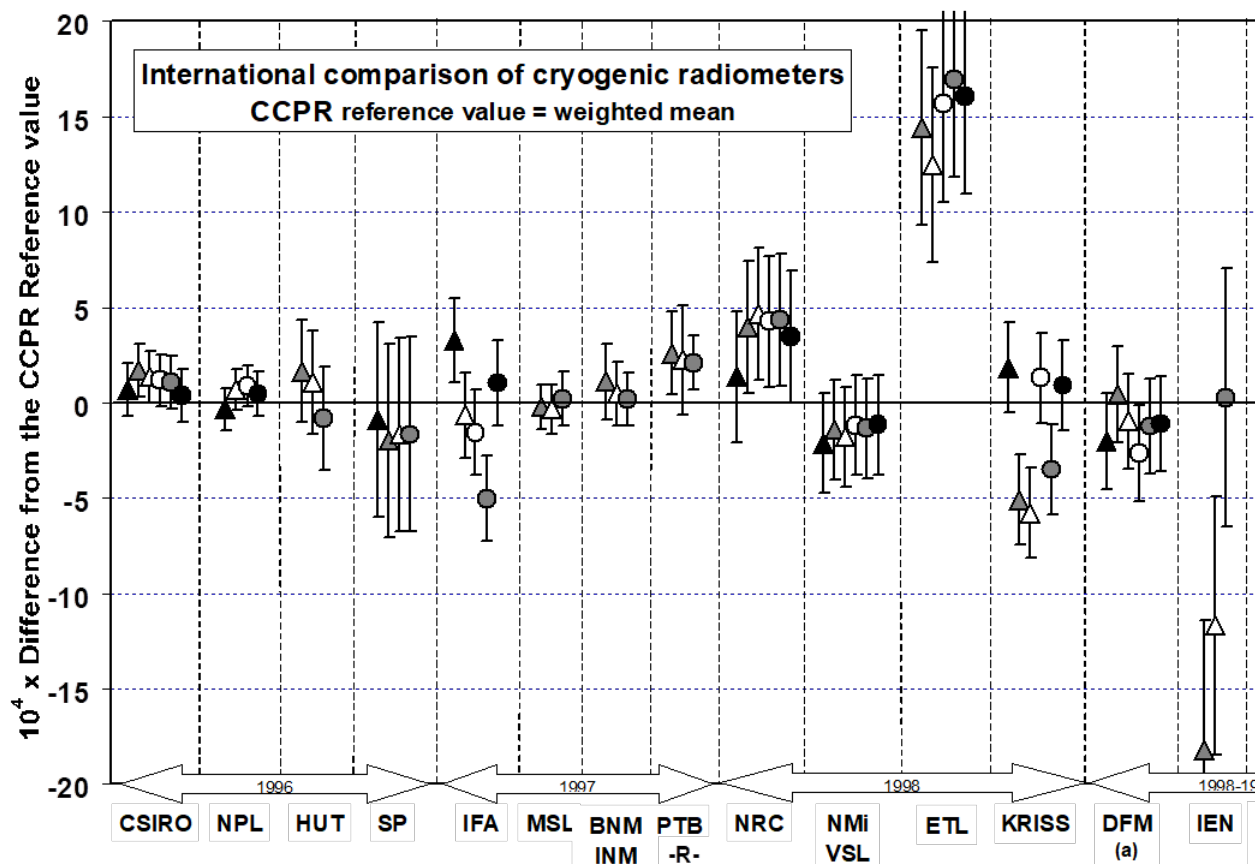
Incertitudes de mesure

La correction globale à appliquer à la mesure de la puissance du rayonnement optique faite par le radiomètre cryogénique est détaillée dans le tableau suivant pour la longueur d'onde de 633 nm avec les incertitudes associées..

Source d'erreur	Correction	Incertitude-type relative
Absorption de la cavité	0,999 98	1×10^{-5}
Transmission du hublot	0,999 88	2×10^{-5}
Réflexion sur le hublot	0,000 034	$0,4 \times 10^{-5}$
Non-équivalence du chauffage	1,000 00	1×10^{-5}
Étalonnage électrique	1,000 00	3×10^{-5}
Répétabilité des mesures	1,000 00	3×10^{-5}
Correction globale	0,999 83	5×10^{-5}

Comparaisons internationales

Le radiomètre cryogénique du laboratoire participe à des comparaisons internationales organisées par le Bureau International des Poids et Mesures ou l'organisation européenne de Métrologie Euramet. Ces comparaisons ont pour but d'établir une traçabilité internationale des mesures.



Sensibilité spectrale absolue: chiffres clés

Longueurs d'ondes accessibles: 266 nm, 325 nm, 454 nm - 514 nm, 543 nm, 612 nm, 1150 nm, 1523 nm.

Niveaux de puissance mesurable: 100 nW- 1mW.

Incertitude-type composée: quelques 10^{-5} .

Détecteurs employés: Détecteurs pièges (Si, InGaAs), détecteurs cavités pyroélectrique.

Voir ces détails dans l'article publié dans la Revue Française de Métrologie :

[Caractérisation et validation d'un nouveau radiomètre cryogénique au LNE-LCM.](#)