

TP d'Optique | Photodétection

L'**objectif** de cette séance est, entre autre, de préparer des expériences qui peuvent être exploitées dans les montages :

- M11. Émission et absorption de la lumière.
- M12. Photorécepteurs.
- M23. Mise en forme, transport et détection de l'information.
- M24. Signal et bruit.
- M31. Résonance.
- M27. Systèmes bouclés.

Expériences proposées

- Transmission numérique sur fibres optiques (**M23** - M24 - M31 - M27) 3 exemplaires
 - Mesure de la capacité parasite d'une photodiode (M12 M23)
 - Performance de circuits de photodétection, mise en forme (M23, M31, M27)
- Mesure de la caractéristique courant-tension d'une photodiode (en deux exemplaires) (M12, M11)
- Mesure de la sensibilité spectrale d'une photodiode (M11 - M12)
- Mesure des caractéristiques d'un photomultiplicateur (M12 - M24)
- Détecteur de position
- Caméra infrarouge

Sources :

- Sextant (section photodétecteurs bien faite II.2)
- notices des composants, du dispositif d'alimentation du PM, de la maquette 349...

Planning

Séance 1

	13h30 9h00	14h30 10h00	15h45 11h15	16h45 12h15
G1	Capteur Position	PM	LED circuits -photodiode	
G2	Sens. spectrale PhD	Capteur Position	LED circuits -photodiode	
G3	Caméra Infrarouge	Sens. spectrale PhD	Caract. statique	
G4	PM	Caméra Infrarouge	Caract. statique	
G5	LED circuits -photodiode		Capteur Position	PM
G6	LED circuits -photodiode		Sens. spectrale PhD	Capteur Position
G7	Caract. statique		Caméra Infrarouge	Sens. spectrale PhD
G8	Caract. statique		PM	Caméra Infrarouge

Séance 2

	13h30 9h00	14h30 10h00		15h45 11h15	16h45 12h15
G1	Caract. statique			Caméra Infrarouge	Sens. spectrale PhD
G2	Caract. statique			PM	Caméra Infrarouge
G3	LED circuits -photodiode			Capteur Position	PM
G4	LED circuits -photodiode			Sens. spectrale PhD	Capteur Position
G5	Caméra Infrarouge	Sens. spectrale PhD		Caract. statique	
G6	PM	Caméra Infrarouge		Caract. statique	
G7	Capteur Position	PM		LED circuits -photodiode	
G8	Sens. spectrale PhD	Capteur Position		LED circuits -photodiode	

Transmission numérique sur fibre optique plastique

Le dispositif support à ces expériences est composé d'une LED SFH750V ([documentation constructeur](#)) et d'une photodiode SFH250 ([documentation constructeur](#)) reliées par une fibre optique plastique.

Le **bloc d'émission** est composé d'une LED, pilotée simplement par le GBF selon le schéma de la [figure 1](#) (ne pas oublier de régler l'amplitude et l'offset du générateur, de calculer la résistance de protection afin de piloter le courant dans la LED entre 0 et 40mA environ)

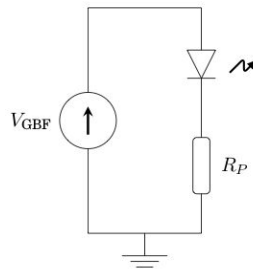
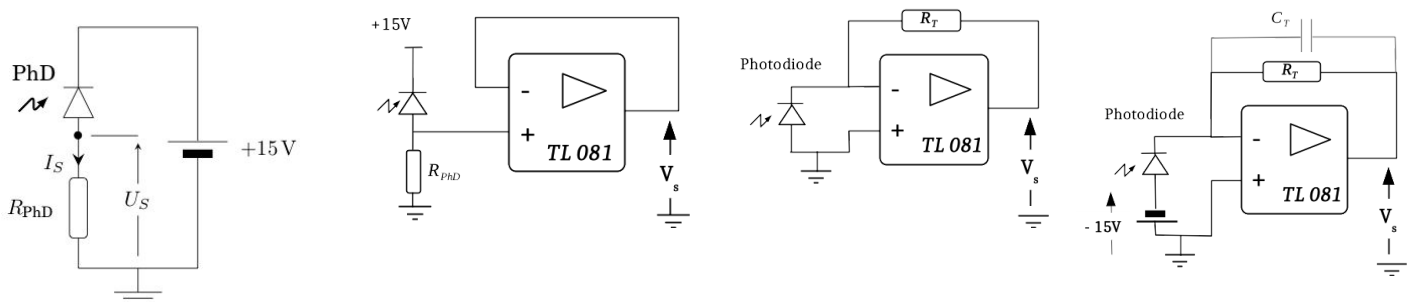


Figure 1 : Circuit d'émission. La LED utilisée permet la mise en place aisée d'une fibre plastique pour collecter son flux.

A la **réception**, on place une photodiode. Réaliser successivement les 4 circuits de photodétection de la [figure 2](#).



2a : Circuit de base

2b : Ajout d'un suiveur.

2c: Montage transimpédance.

2d : Transimpédance, polarisation et condensateur anti-résonance.

Figure 2 : Circuits de détection

Mesures proposées :

- Pour chacun des ces montages,
 - mesurer le temps de réponse / la bande passante (ou au moins l'allure de la réponse en fréquence avec le mode SWEEP du générateur) pour des valeurs de R_{PhD} ou de R_T variant entre 10k Ω et 100k Ω
 - tester la transmission pour des transferts de données binaires, utiliser le format "PRBS (pour Pseudo-Random Bits Sequence) du générateur. Une analyse fréquentielle en utilisant le mode FFT de l'oscilloscope permet de mesurer le support fréquentiel du signal aléatoire et la modification du spectre apportée par la détection.

- Déduire des mesures sur le circuit 2b, la valeur de la capacité parasite de la photodiode, la comparer à la valeur donnée par le constructeur. (On pourra mesurer l'effet de la valeur de la tension de polarisation sur cette valeur de capacité parasite.)
- Mesurer la fréquence des pseudo-oscillations et la fréquence de résonance du circuit 2c.

Outils pour la modélisation de ces circuits et l'analyse des résultats

Une photodiode est un détecteur quantique qui, si elle est polarisée correctement, produit un électron pour chaque photon reçu avec un rendement quantique donné. La grandeur d'intérêt, proportionnelle au flux lumineux reçu, est donc le courant électrique.

Le circuit le plus simple pour transformer le photocourant en une tension (plus facile à mesurer) est le circuit 2a. Il permet de conserver une tension toujours négative aux bornes de la photodiode (voir mesure de la caractéristique), et permet la mesure de la tension U_S proportionnelle au flux reçu.

La dynamique de ce circuit (la LED a un temps de réponse de $0,1\mu s$, ce n'est pas elle qui limite) fait apparaître un comportement passe-bas, avec une bande passante inversement proportionnelle à la résistance de charge.

Le circuit 2b a le même comportement, mais avec une bande passante plus grande (et donc un temps de réponse plus court). Ces deux expériences mettent en évidence la présence d'une capacité parasite dans le circuit.

Si on modélise la photodiode par une source de courant avec une capacité parasite en parallèle (voir [figure 4](#)) la mesure de la bande passante dans le cas du circuit 2 permet de remonter à la valeur de capacité parasite. Dans le cas du circuit 1, la capacité parasite du câble que l'on utilise pour faire la mesure ralentit encore le circuit, la bande passante est alors réduite à $\frac{1}{2\pi R(C+C_{cble})}$.

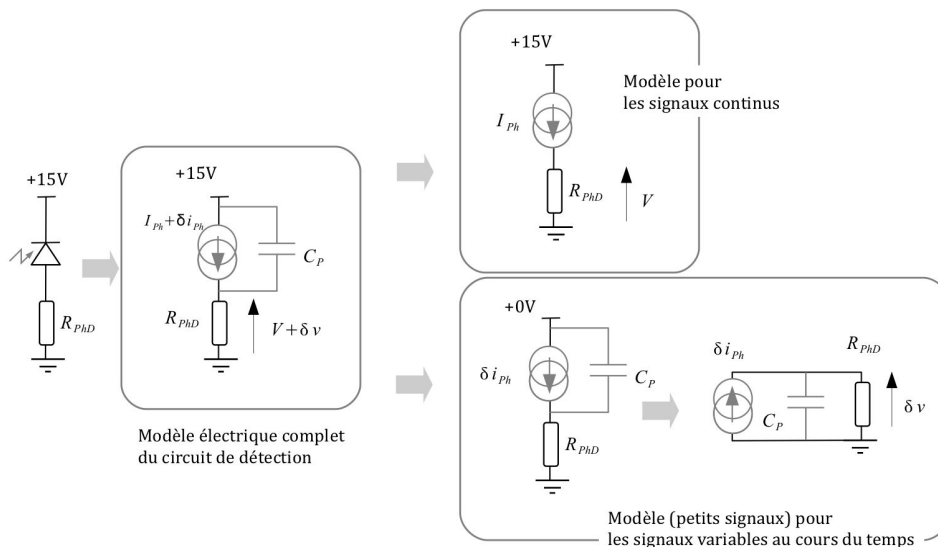


Figure 4 : Modélisation d'une photodiode par une source de courant et une capacité parasite.

Le montage 2c est un montage transimpédance, il permet d'augmenter significativement la bande passante mais il fait apparaître un phénomène de résonance. Pour expliquer ce phénomène de résonance, il faut prendre en compte la dynamique de l'amplificateur opérationnel, et utiliser un modèle de système bouclé. Le fonctionnement du circuit transimpédance peut être modélisé par un système bouclé (le modèle et le calcul

de réponse en fréquence est disponible dans l'annexe "Systèmes bouclés simples : les circuits à amplificateurs opérationnels. Exemple du transimpédance."

La réponse en fréquence obtenue en boucle fermée correspond à un celle d'un filtre du second ordre, avec une fréquence de résonance (Gain-peaking frequency) que l'on peut approcher par

$$\sqrt{f_c \cdot (A0 + 1)} f_0 \approx \sqrt{f_c \cdot GBP}$$

$$\omega_c = \frac{1}{R_T C_P}$$

Rajouter un condensateur de faible valeur (quelques pF) en parallèle de la résistance de charge comme sur le circuit 2d, permet de limiter la résonance (quitte à perdre un peu de bande passante).

Mesure des principales caractéristiques d'une photodiode.

Caractéristique courant-tension

Réaliser le montage de la figure 5 ci-dessous, et observer la caractéristique $I(U)$ de la photodiode à l'oscilloscope, en mode x-y. Observer qualitativement comment cette caractéristique est modifiée en présence de lumière.

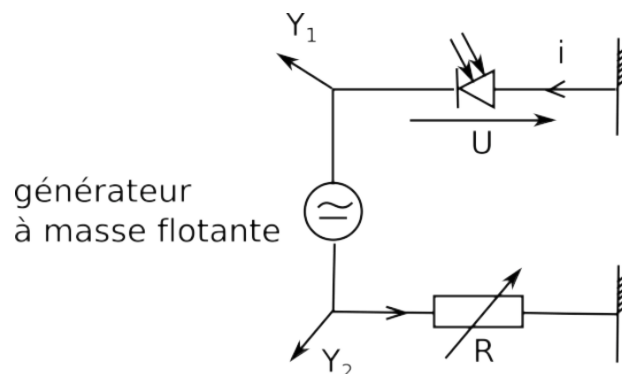


Figure 5 : Circuit pour le tracé de la caractéristique courant-tension à l'oscilloscope.

Remarque : comme chaque fois que l'on veut relever la caractéristique $U(i)$ d'un dipôle, en se servant d'une résistance pour visualiser le courant, on est confronté à un problème de masse. Une solution est, comme ici, d'utiliser un générateur à masse flottante (avec un générateur qui n'est pas à masse flottante, une des bornes du générateur est forcément mise à la masse, si bien que l'on court-circuite un des composants). Au département, seuls les vieux wavetek sont vraiment à masse flottante (pour les générateurs Agilent 33220, l'impédance entre la borne de sortie du GBF et la terre n'est pas suffisante). Attention : avec un générateur pas suffisamment bien flottant, l'expérience marche très mal.

Une autre solution consiste à placer un transformateur d'isolement (transformateur 1:1) entre le générateur et le circuit. Ou encore à utiliser une sonde différentielle active de mesure (disponible dans la collection d'électronique).

Enfin, les photodiodes PIN10 et les photodiodes thorlabs SM1PD1B, pratiques pour réaliser cette expérience

car elles ont une grande surface active, sont connectées avec la partie "masse" du connecteur BNC du côté anode de diode (c'est à dire comme représenté ci-dessous).

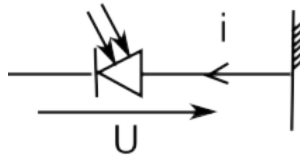


Figure 6 : connexions des photodiodes PIN10 et SM1PD1B

Linéarité du photocourant en fonction de la puissance lumineuse.

Faire varier l'intensité lumineuse reçue par la photodiode de manière contrôlée à l'aide de deux polariseurs, afin de vérifier que le courant qui traverse la photodiode dans la partie "bloquée" de sa caractéristique varie bien linéairement avec l'intensité lumineuse. Proposer un montage électronique simple délivrant une tension proportionnelle à la puissance lumineuse reçue.

Rq :

- pour alimenter la lampe QI, utiliser une alimentation continue, de manière à travailler avec des intensités lumineuses constantes.
- avec ce montage, on peut aussi directement mesurer **la sensibilité de la photodiode (en A/W)**, pour une longueur donnée, en mesurant le photo-courant produit lorsqu'on éclaire la photodiode avec un petit laser dont on a au préalable mesuré la puissance.

Mesure de la sensibilité spectrale d'une photodiode

Ref. : Sextant, paragraphe II.4.4.1, notice O.43

Comme nous l'avons vu, si elle est correctement polarisée, une photodiode se comporte comme un générateur de courant, ce courant étant proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La sensibilité de la photodiode s'exprime donc en A/W. Vu le mécanisme de production des paires électron-trou, cette sensibilité dépend fortement de la longueur d'onde. En effet :

- pour une photodiode idéale, chaque photon incident donne naissance à un électron (on dit alors que l'efficacité quantique vaut 1),
- le nombre de photons par seconde dans un faisceau de 1mW (par exemple) est plus important pour une lumière rouge que pour une lumière bleue (un photon bleu étant plus énergétique);

La sensibilité d'une photodiode est donc plus importante dans le rouge que dans le bleu. En supposant une efficacité quantique de 1, on prévoit une sensibilité de 0,64 A/W @800nm (énergie d'un photon @800nm : 1,55 eV), et de 0,32 A/W@400nm (faites le calcul !).

Bien sûr, si la longueur d'onde est trop grande, les photons incidents auront une énergie inférieure à celle du gap du semi-conducteur, et aucun photon ne sera détecté.

On s'attend donc, dans cette approche grossière, à une sensibilité spectrale ayant l'allure donnée sur la figure 7 ci-dessous.

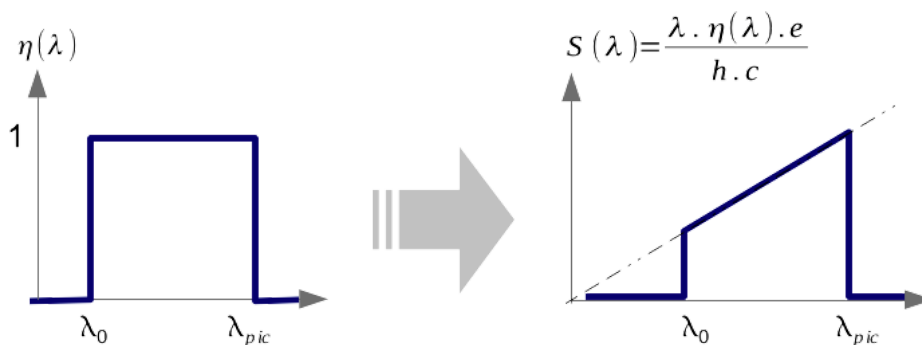


Figure 7 : Allure de la sensibilité spectrale $S(A/W)$ en fonction de la longueur d'onde λ d'un photodétecteur quantique, de rendement quantique $\eta(\lambda)$.

Le but de l'expérience est de relever la sensibilité spectrale réelle d'une photodiode. Pour cela, nous allons utiliser un détecteur dont on sait que la réponse est indépendante de la longueur (fonctionnant sur un autre principe, photo-thermique ; il s'agit d'un pyromètre). Ce détecteur (dont la sensibilité est indépendante de la longueur d'onde) va servir de référence pour comparer la sensibilité de la photodiode à différentes longueurs d'onde. Pour sélectionner une longueur d'onde donnée, nous allons utiliser un monochromateur un peu modifié afin de pouvoir travailler dans le proche infra-rouge (ou se situe le gap du silicium, vers 900 nm...). Pour le détail de l'expérience (nécessité d'un hachage de la lumière, etc...), se référer à la notice O.43 ou au Sextant.

Mesure des caractéristiques d'un photomultiplicateur

Ref. : Sextant, paragraphe II.3.2, notice O.72

Les tubes photomultiplicateurs sont des détecteurs utilisant un effet photo-électrique dit externe. Lorsqu'un photon suffisamment énergétique percute une électrode métallique (en général un alliage), un électron est arraché à celle-ci. Cet électron est ensuite multiplié grâce à un effet d'avalanche :

- une forte tension accélère le premier électron (produit par effet photo-électrique), qui percute ensuite une deuxième électrode, donnant naissance à une gerbe de plusieurs électrons,
- ceux-ci sont à nouveau accélérés jusqu'à une troisième électrode,
- etc...

Un schéma de principe est donné sur la figure 8 ci-dessous.

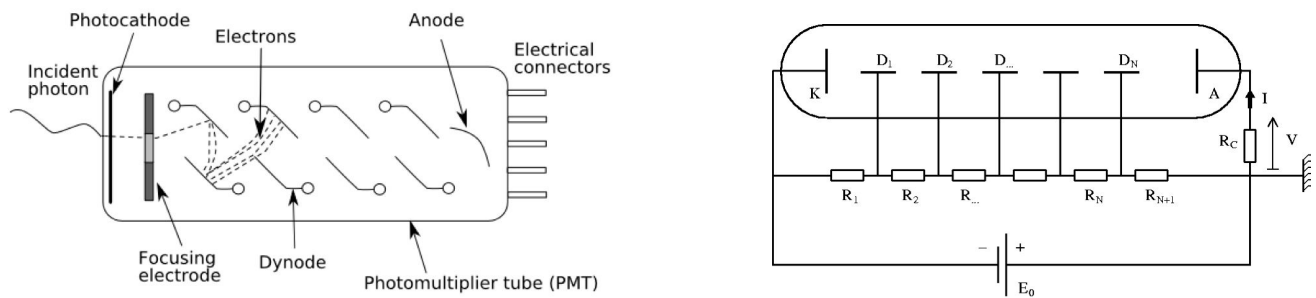


Figure 8 : Schéma de principe d'un photomultiplicateur et circuit de polarisation.

L'intérêt de ce genre de capteur est leur très grande sensibilité, due au gain énorme (de 1 million à un milliard, selon la valeur de la tension accélératrice) qu'apporte la multiplication de l'électron initial. Il est ainsi possible de détecter des photons un par un, avec ce genre de capteur.

Il s'agit donc à notre avis de la principale propriété à illustrer dans le temps bref d'un montage.

L'objectif est donc de comparer la sensibilité du PM (en A/W) à celle d'une photodiode (ici une photodiode BPW34). Ici, celle du PM peut atteindre 104-105 A/W (grâce au fort gain interne), alors que celle d'une photodiode est de l'ordre de 0,5 A/W dans le visible.

Pour cela, les deux détecteurs sont polarisés, puis éclairés avec un laser de puissance connue. Le photo-courant produit est alors mesuré à travers une résistance de charge.

- Mesurer la sensibilité (en A/W) du PM polarisé sous 1,1kV (par exemple), si possible dans le vert et le rouge. La sensibilité correspondant à la première étape photo-électrique est donnée par le constructeur (voir notice). En déduire le gain interne du PM.
- Mesurer la sensibilité (en A/W) de la photodiode BPW34. Comparer à celle du PM.

Remarque : la sensibilité du PM est bien meilleure grâce à son fort gain interne. Mais l'efficacité de l'étape photo-électrique est en fait beaucoup moins bonne que pour une photodiode : pour une photodiode, presque 90% des photons sont convertis en paires électron-trou, alors que pour le PM, seulement quelques % des photons incidents sont convertis en électron (le PM peut voir les photons 1 par 1, mais il en manque 9 sur 10 !).

Influence de la tension accélératrice sur le gain (voir Sextant).

On s'attend à ce que le gain G varie comme V^{n-1} , où n est le nombre d'étages d'amplification (9 pour le PM utilisé). En pratique, G varie comme V^a avec a un peu inférieur à $n-1$. Il est bien sûr possible, avec ce matériel, d'étudier cette dépendance.

Analyse du bruit "de photon"

Les puissances lumineuses mesurées sont en général très faibles. Le "bruit de photon" joue alors un rôle important, et entraîne des rapports signal/bruit faibles.

L'ensemble de l'électronique produit suffisamment peu de bruit technique pour que le bruit observé en sortie du dispositif soit dû uniquement (même si cela peut paraître surprenant) :

- au bruit du courant d'obscurité
- et au bruit de photon.

Une étude détaillée du bruit de photon est possible avec ce dispositif. Si vous souhaitez plus de détails sur ce point, vous pouvez vous référer à l'annexe "Qu'appelle-t-on le bruit de photon ?".

Pour cela, l'idéal est de mettre en place un traitement du signal afin de détecter les positions temporelles des impulsions détectées. Un traitement par "filtrage adapté" c'est-à-dire une détection par corrélation permet par exemple de détecter toutes les impulsions produites par le PM.

Sans aller jusque là, une mesure de l'écart type du courant de sortie, à l'oscilloscope permet de vérifier une propriété importante de la statistique poissonnienne : le fait que l'écart type est proportionnel à la racine carrée de l'intensité moyenne. Pour cela, on pourra tracer, à gain constant et pour plusieurs éclaircissements, l'écart type du signal en fonction de sa valeur moyenne. En comparaison, pour une luminosité constante et en faisant varier le gain du PM, l'écart type doit varier linéairement avec la valeur moyenne.

Pour plus de détails sur le filtrage adapté avec une introduction à la théorie de la détection voir

<http://lense.institutoptique.fr/ressources/MINE/Comprendre/TraitementSignal/PolyProTIS.pdf>

et

<http://lense.institutoptique.fr/ressources/MINE/Comprendre/TraitementSignal/DiaposProTISvCourte.pdf>

Détecteur de position

Principe de fonctionnement : voir notice O.12

Expérience : sur un banc, fixer un laser de puissance 1 mW environ, ainsi que le détecteur (sur un cavalier muni d'une translation micrométrique). Mesurer sa sensibilité (en V/m). Estimer le plus petit déplacement détectable.

Caméra Infrarouge

Le signal électrique fourni par chaque pixel d'une caméra thermique est proportionnel au flux lumineux reçu dans la gamme de longueur d'onde [8 μm - 12 μm]. Ce flux lumineux étant lui-même proportionnel à la température de la source du rayonnement, on utilise ces caméras pour des applications de thermographie.

Le paragraphe suivant présente une brève introduction à l'imagerie infrarouge thermique.

Sources thermiques et capteurs à microbolomètre

Rayonnement d'un corps noir

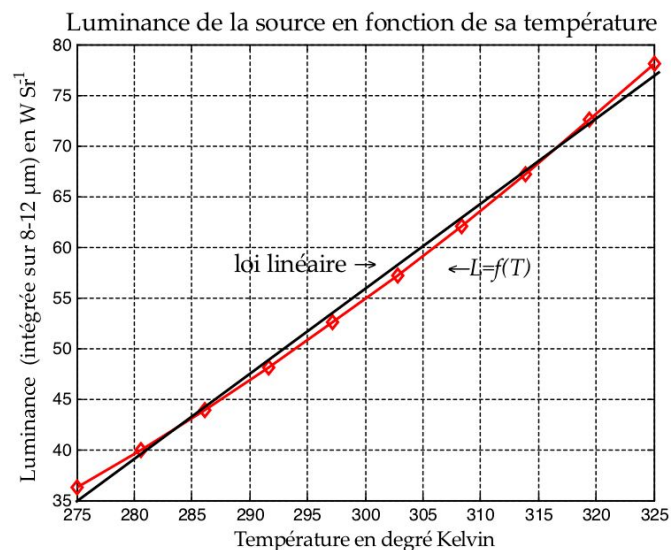
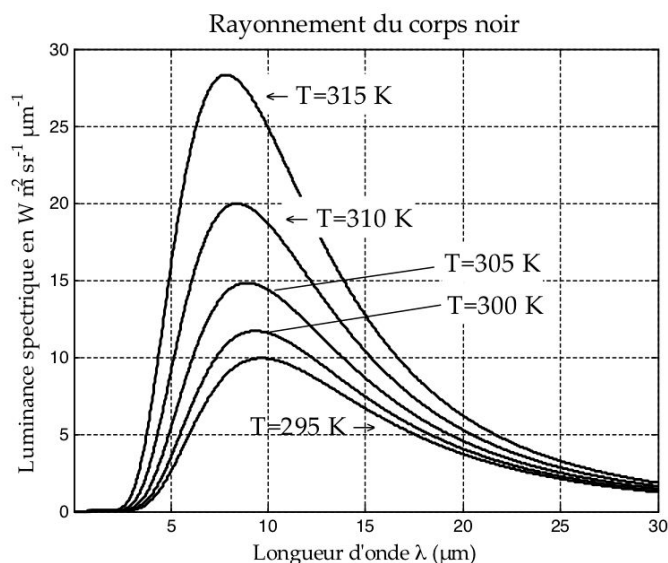
La loi de Planck décrit la luminance spectrique d'un corps noir :

$$\left[\frac{dL_e}{d\lambda} \right]_{\text{CN}}^T = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

où $\left[\frac{dL_e}{d\lambda} \right]_{\text{CN}}^T$ est exprimée en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{m}^{-1}$, T est la température du corps noir en Kelvin, λ est la longueur d'onde en mètre, $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ (constante de Planck), et $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ (constante de Boltzmann).

La courbe d'évolution de cette fonction est représentée sur la [figure 9](#) pour quelques valeurs de la température T .

Quand on intègre cette fonction dans la gamme de l'infrarouge lointain, c'est à dire $[8\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}]$ on obtient une relation linéaire entre la température du corps noir et la luminance intégrée L_{CN}^T (en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$).



7

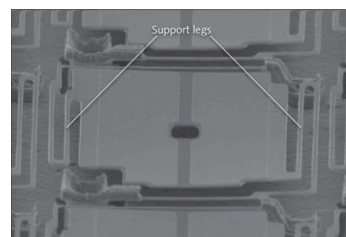
Luminance spectrique du corps noir pour différentes températures

Luminance spectrique intégrée sur la gamme $[8\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}]$.

Figure 9 : La luminance dans la gamme $[8\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}]$ d'un corps noir est proportionnelle à sa température.

Capteurs à microbolomètres

Des caméras thermiques à base de capteurs quantiques (photodiodes) nécessitent d'être refroidies. Les pixels des caméras infrarouges non refroidies sont des microbolomètres (représentés sur la [figure 10](#)).



Une caméra IR scientifique
<https://www.flir.fr/products/a655sc/>

Une matrice de microbolomètres

Un pixel= un microbolomètre
www.ulis-ir.com

Figure 10 : Le capteur (au centre) d'une caméra infrarouge (à gauche) est formé de microbolomètres (à droite).

Chaque microbolomètre reçoit le flux infrarouge d'un point de la scène observée, sa propre température évolue en fonction de ce flux reçu, et donc sa résistance électrique évolue de même. Au final, le signal lu par la caméra est proportionnel à la température de l'objet observé par la chaîne décrite sur la figure 11 :

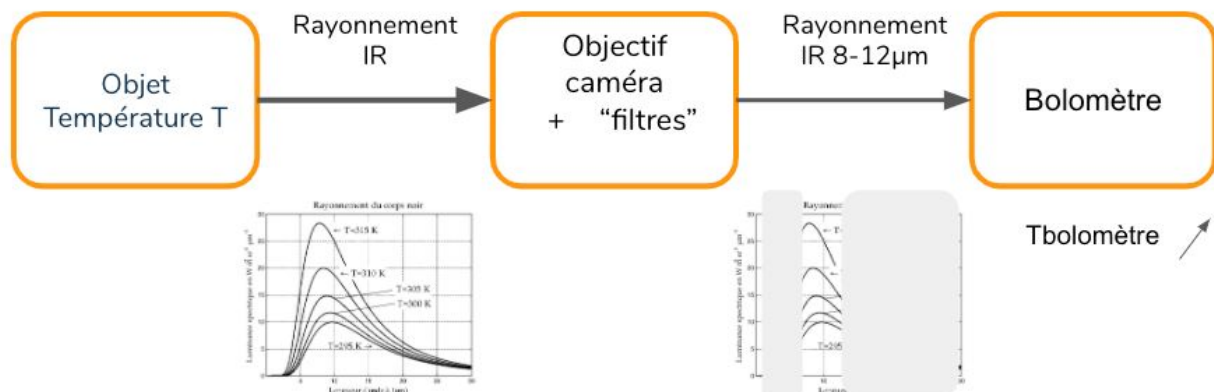


Figure 11 : Principe du fonctionnement d'une caméra thermique

Emissivité

Tous les corps ne sont pas des corps noirs, le paramètre utile pour les caractériser est alors leur émissivité. Dans le cas général, la luminance de la source L_X^T (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) peut être réécrite sous la forme :

$$L_X^T = \varepsilon \cdot L_{\text{CN}}^T + \frac{1 - \varepsilon}{\pi} \cdot E$$

où L_{CN}^T est la luminance d'un corps noir à la même température et E en ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) est l'éclairement ambiant, Toutes ces grandeurs sont des grandeurs radiométriques intégrées sur la bande spectrale [8 μm - 12 μm].

Cette expression fait apparaître deux termes : le premier est la luminance propre de l'objet, proportionnelle à celle qui serait émise par un corps noir à la même température, le facteur de proportionnalité étant l'**émissivité** ε (aptitude d'un matériau à rayonner). Ce terme est souvent qualifié de **contribution émissive**. Le second terme représente la réflexion diffuse de l'éclairement ambiant, et est appelé la **contribution réfléctive**.

Remarque 1 : Pour mesurer l'émissivité d'une surface, pour s'affranchir de la contribution réfléctive, on réalise quatre mesures :

- Du flux infrarouge provenant de la surface, à deux températures différentes,
- Du flux infrarouge provenant d'un corps noir, ou d'une surface émissivité connue, aux deux mêmes températures.

Remarque 2 : Pour connaître la température d'une surface à l'aide d'une caméra infrarouge, il est donc nécessaire de connaître à la fois l'émissivité de la surface et la température ambiante.

Bruit du détecteur - NETD Noise Equivalent Temperature Difference

La différence de température équivalente au bruit (ou NETD en anglais, pour Noise Equivalent Temperature Difference) renseigne sur la **sensibilité thermique** d'une caméra, c'est-à-dire sur sa capacité à distinguer de petites variations de température.

Par définition, la NETD de la caméra infrarouge est la différence de température de corps noir qui entraîne une variation de signal égale à l'écart-type σ_s (valeur efficace) du bruit. Le schéma de la [figure 12](#) illustre le lien entre NETD (donnée en Kelvin) et l'écart type du bruit.

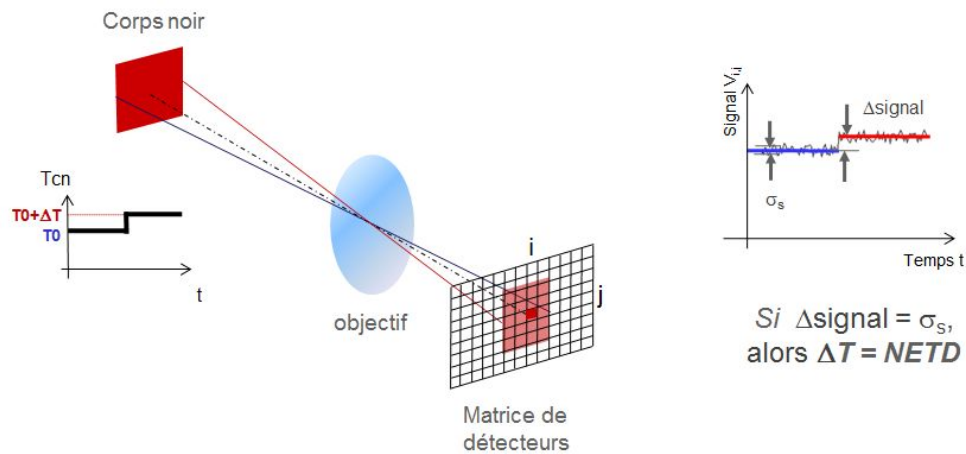


Figure 12 : Définition de la NETD

Caméra Fluke

La caméra à votre disposition est une caméra Fluke TiS20 dont on peut analyser l'image via le logiciel Fluke SmartView.

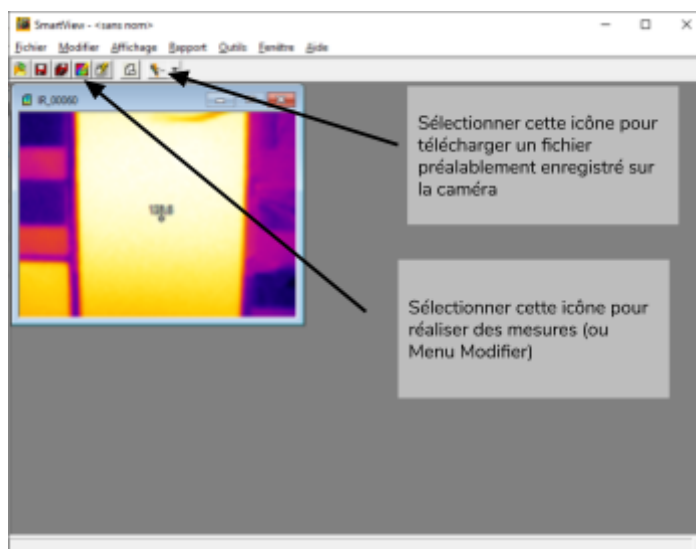
La source est une plaque chauffée à 55°C , sur un banc didactique Chauvin-Arnoux CA1875.

Avec ces deux dispositifs il est possible de réaliser des mesures :

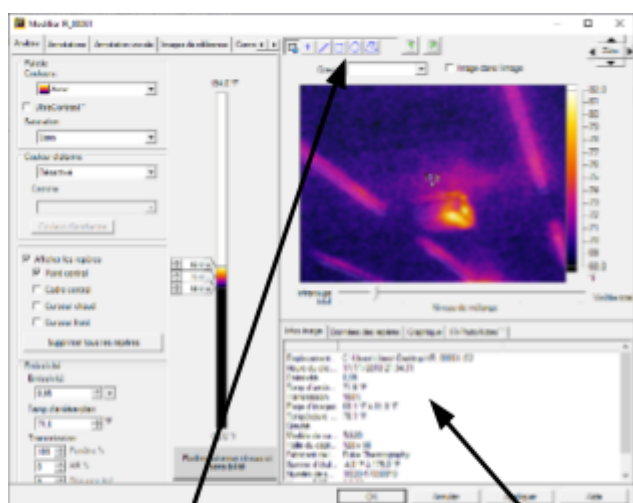
- d'émissivité de quelques surfaces,
- du bruit de la caméra, plus précisément de la NETD (Noise Equivalent Temperature Difference).

Utilisation de la caméra

Lancer le logiciel SmartView et ouvrir l'outil de mesure

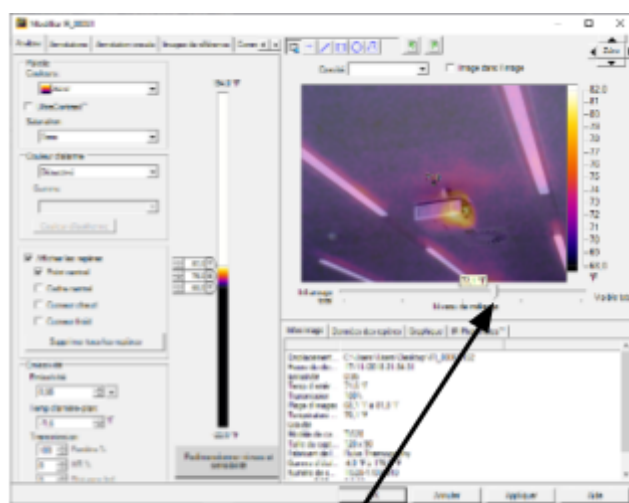


Mesurer la température mesurée par la caméra pour des surfaces d'émissivité différente. Mesurer l'écart type du bruit sur une zone homogène pour obtenir une mesure de la NETD.



Sélectionner une zone ou un pixel dans l'image à l'aide des outils

Les résultats de mesure s'affichent dans le cadre



La fusion des images visible et IR est réglable par le curseur