

Erreurs de mesure inhérentes à l'utilisation de fenêtre infrarouge en thermographie

Rédacteur :

Jean Michel DEMOYER
Expert en Thermographie Infrarouge
certifié Niveau III ASNT et ISO 18436
Instructeur licencié ITC

MENSOR
33(0)6 85 80 28 47 Jm.demoyer@mensor.fr
6 chemin des Planches – 49250 BEAUFORT en Anjou
www.mensor.fr

Objet : Evaluer les erreurs de mesure et d'interprétation dans le cas de mesure par thermographie avec une fenêtre infrarouge. Cette étude aura donc pour but d'étudier les paramètres d'influences de la transmission pour chacune des fenêtres ou objet semi transparent. Cette étude est réalisée sur une base non théorique, et donc sous forme de mesures.

Les rayonnement sont mesurés par un capteur possédant une bande spectrale propre.

Une étude théorique implique ne connaissance des bandes spécifiques de chaque caméra, et, des propriétés complètes des matériaux utilisés pour la fabrication de ces fenêtres, dans cette bande spectrale. Ce scénario est difficile voir impossible à réaliser.

1. Introduction

Les mesures sans contact utilisent la mesure du rayonnement émis par la surface de l'objet pour en calculer la température. Ces méthodes se nomment **pyrométrie** ou **thermographie infrarouge**.

L'étude porte sur certaines situations de mesures sans contact qui nécessitent de regarder à l'intérieur d'une cellule étanche : par exemple , les cas d'une cellule haute tension ou dans certain fours. Des fenêtres infrarouges sont alors nécessaires.

2. Contexte de l'essai

La très grande majorité des caméras utilisées aujourd'hui en thermographie infrarouge utilisent la bande spectrale 7,5 à 14 μm ou Ondes Longues (LW). De ce fait, les essais et mesures effectués ne se feront qu'avec des caméras LW et les propriétés étudiées seront donc **grises** dans cette bande 7,5 à 14 μm L'évaluation des erreurs de mesures permettra une comparaison des différentes fenêtres infrarouges.

Valeurs GRISE

Les propriétés ou paramètres suivant :

τ = Facteur de transmission, ϵ = Facteur d'émission, ρ = Facteur de réflexion
sont dépendants de la longueur d'onde

Le radiomètre mesure la totalité des rayonnements dans sa bande spectrale et effectuera lors des mesures les valeurs moyennes des propriétés dans celle ci

Les principaux paramètres pris en compte dans cette étude seront

1. La transmission
La transmission sera influencée par la nature des matériaux, de la qualité des matériaux, de l'épaisseur et de l'angle de visée
2. La température de la fenêtre
3. La température de la cible

3. Moyens utilisés



Sources rayonnantes

Les mesures seront réalisées à partir de sources rayonnantes ramenées à des équivalents corps Noirs étendus dont il sera fait varier leurs températures apparentes. La précision des valeurs absolues de la température ne joue aucun rôle dans les essais car il s'agit toujours d'une mesure de ratio entre l'énergie transmise et incidente de la source sans fenêtres et avec fenêtres. Seules les dérives temporelles auront une importance pour des comparaisons dans le temps. Celle-ci sont donc caractérisées et connues. Les températures équivalentes *Corps Noir* étudiées de ces sources : 0°C, 30°C, 50°C, 80°C, 200°C +

Caméra infrarouge

Deux caméras de thermographie Infrarouge seront utilisées

FLIR A25 avec le logiciel RESEARCHER

La caméra utilise un détecteur de technologie VOX (oxyde de Vanadium)

FLIR E300 utilisé avec le Logiciel FLIR TOOLS

La caméra utilise un détecteur avec une technologie en Silicium Amorphe (ULIS)

Fenêtres infrarouges

Les différentes fenêtres étudiées sont celles présentes sur le marché avec une palette de transmission significative

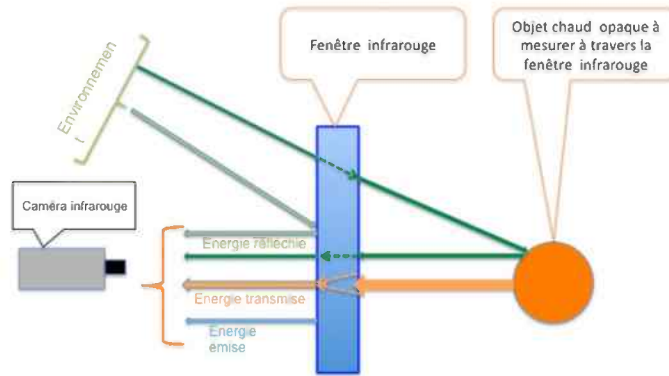


1. Une fenêtre en **CAF2** - Fluorure de Calcium (Fluorine) d'une épaisseur de 2mm
2. Une fenêtre en **BAF2** - Fluorure de Barium d'une épaisseur de 3 mm
3. 1 épaisseur de film organique **PolyIR@** d'une épaisseur de 0,38mm
4. Fenêtre en film mince de type emballage d'une épaisseur d'environ 10 μm
5. Une fenêtre nid d'abeille

4. Description de l'essai

La prise en compte des paramètres d'influence des fenêtres infrarouges revient à travailler sur l'équation radiométrique qui régit la thermographie

Situation réelle sur objet chaud assimilé à un corps gris dans la Bande spectrale LW ou l'influence de l'atmosphère est négligée au regard des très faibles distances en jeu



Equation radiométrique appliquée à cette situation s'écrit

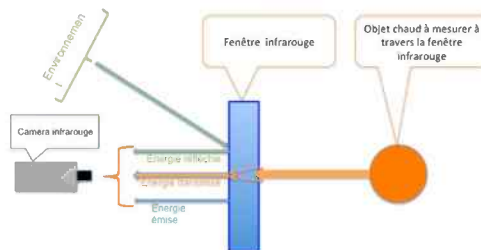
$$L_{\text{mesuré}} = (L_{(\lambda)}_{\text{objet}} + L_{(\lambda)}_{\text{env}} * \rho_{(\lambda)}_{\text{objet}}) * \tau_{\text{fenêtre}} + L_{(\lambda)}_{\text{fenêtre}} * \epsilon_{(\lambda)}_{\text{fenêtre}} + L_{\text{env}} * \rho_{(\lambda)}_{\text{fenêtre}}$$

Avec les propriétés suivantes

τ = Facteur de transmission, ϵ = Facteur d'émission, ρ = Facteur de réflexion

Dans cette étude, la cible est considérée comme un objet opaque de grande émissivité, assimilé à un corps noir équivalent dont la part réflexion est négligée

L'équation radiométrique induite par cette simplification devient

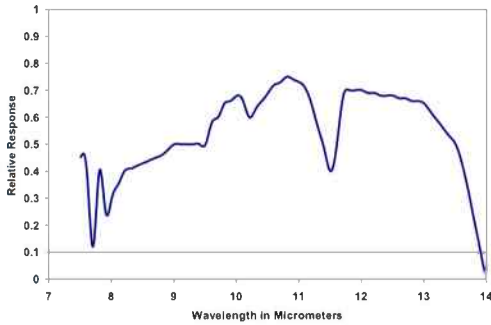


$$L_{\text{mesuré}} = L_{(\lambda)}_{\text{objet}} * \tau_{(\lambda)} + L_{(\lambda)}_{\text{fenêtre}} * \epsilon_{(\lambda)}_{\text{fenêtre}} + L_{\text{environnement}} * \rho_{(\lambda)}_{\text{fenêtre}}$$

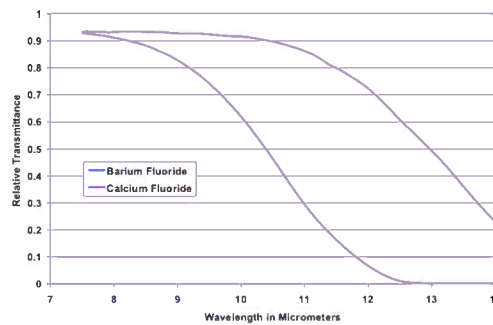
Les valeurs de τ , ϵ , ρ sont grises dans la bande spectrale

Facteur de Transmission de la fenêtre

Chaque fenêtre infrarouge a une transmission différente pour la bande spectrale des caméras LW



Transmission film plastique



Transmission des fenêtres en CAF2 et BAF2

Selon la bande spectrale utilisée, les matériaux transmettront des manière différente.
Le choix d'une fenêtre sera dépendant de la bande spectrale LW de l'instrument de mesure

Les fenêtres sélectionnées sont celles qui sont actuellement disponibles sur le marché soit :

Fluorine (CAF2)

Matériau couramment utilisé pour faite des fenêtres infrarouges quelque soit le choix du type de camera (LW ou MW) dont les principales caractéristiques sont

Le coefficient d'absorption = $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ à $2,7 \mu\text{m}$

Coefficient de dilatation $18,85 \mu\text{m/m} \cdot ^\circ\text{C}$

Perte en réflexion = 5% à $5 \mu\text{m}$

Indice de réfraction = 1,39908 à $5 \mu\text{m}$

Monocristallin BAF2

Le coefficient d'absorption = $3,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ à $6 \mu\text{m}$

Coefficient de dilatation $18,1 \mu\text{m/m} \cdot ^\circ\text{C}$

Perte en réflexion = 5% à $5 \mu\text{m}$

Indice de réfraction = 1,45 à $5 \mu\text{m}$

Film PolyIR@

Ce film polymère est aussi présent sur le marché

Sont indice de réfraction est de 1,54 sur la bande 8-14 μm

Film plastique mince

Le film utilisé sera un film d'emballage aux propriétés non déterminées dont la transmission sera calculée selon la méthode décrite ci dessous

Calcul de transmission

Cette valeur sera mesuré selon une méthode décrite dans la norme ASTM E1897-97 (2002) *Standard test methods for measuring and compensating for transmittance of a attenuating medium using infrared Imaging radiometer*

Les limites de la méthode imposent une parfaite égalité entre la températures de la fenêtre, la température ambiante et la température réfléchie.

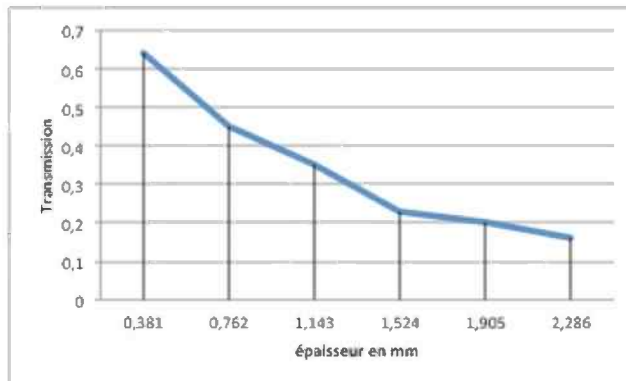
La valeur de la transmission obtenue est la valeur grise dans la bande spectrale du radiomètre utilisé pour le test

Epaisseur et angle d'observation

La valeur de transmittance d'un matériau semi transparent suit une loi exponentielle décroissante qui dépend de l'épaisseur x et du coefficient d'absorption β

$$\text{Loi de décroissance : } e^{-\beta x}$$

Exemple de décroissance de la transmission grise du film PolyIR de 1 à 6 épaisseur de 0,15 inch (0,381 mm)



Les variations d'angles d'observation induisent

- Variation d'émissivité de la fenêtre au delà de 45° (scenario qui ne sera pas étudié)
- Une variation d'épaisseur qui est lié au chemin du rayon avec un angle différent. La longueur ou l'épaisseur grandira selon le $\sin \tau$ et induira une transmission plus importante

L'influence de l'angle revient donc à prendre en compte une variation de transmission liée à l'épaisseur.

Pour cette étude, les angles d'observation seront :

Une observation à la normale (90°)

Une observation à 45°

Au delà de 45 ° le matériau a une émissivité qui décroît fortement au profit de la réflexion

Le coefficient d'absorption β n'est connu que pour des longueurs d'ondes discrètes, les valeurs *grises* de la transmittance équivalente sont donc mesurées

Facteur de réflexion de la fenêtre

Ce facteur est en théorie faible, et jamais connu avec précision. Les informations disponibles sont données seulement pour quelques longueurs d'ondes discrètes. Le facteur de réflexion gris dans la bande spectrale de 7,5 à 14 μm est donc souvent inconnu. Afin d'être le plus complet possible, les facteurs de réflexion il seront mesurés dans la bande spectrale d'une camera LW, pour chaque fenêtre étudiée.

La méthode de mesure du facteur de réflexion se fait avec la prise en compte de l'équation de Kirchhoff soit :

$$\tau_{\text{(Facteur de transmission)}} + \epsilon_{\text{(Facteur d'émission)}} + \rho_{\text{(Facteur de réflexion)}} = 1$$

Meilleure est la transmission, moins les deux autres facteurs prendront une part importante dans le bilan
Les mesures sont effectuées avec un scénario dans lequel :

- L'émission de l'objet est faible (très basse température)
- La valeur du réfléchi est importante

L'environnement du réfléchi est créé par une source radiante de grande surface dont la température de surface est d'environ 200 °. La valeur de celui ci est mesurée en utilisant avec un réflecteur diffusant suivant la procédure décrite dans la norme ISO 18434

La basse température sera une température proche de 0°C (la source est un récipient dont le contenant est à la température de la glace fondante)

La fenêtre étudiée est à température ambiante

Les mesures sont effectuées en mode radiométrique et interprétées par le logiciel FLIR Researcher

Le coefficient ρ sera déterminée en suivant l'équation suivante

L = luminance corps gris dans la bande spectrale LW

$$\rho_{(\lambda)} = (L_{\text{mesuré}} - L_{\text{objet}} * \tau_{(\lambda)} - L_{\text{fenêtre}} + L_{\text{fenêtre}} * \tau_{(\lambda)}) / (L_{\text{environnement}} - L_{\text{fenêtre}})$$

avec

$L_{\text{mesuré}}$: valeur du rayonnement global émis avec la fenêtre et mesurée par la caméra

L_{objet} : valeur du rayonnement de l'objet émis et mesuré par la caméra sans la fenêtre

$L_{\text{fenêtre}}$: valeur du rayonnement émis par la fenêtre et mesuré par la caméra sur le scotch

$L_{\text{environnement}}$ valeur du rayonnement réfléchi par le réflecteur et mesuré par la caméra

τ : valeur de la transmission grise dans la bande LW déterminée ci dessus selon la méthode décrite dans la norme

Température de la fenêtre et de la cible

Température de la fenêtre

Les valeurs retenues seront 20, 40 et 60 °C

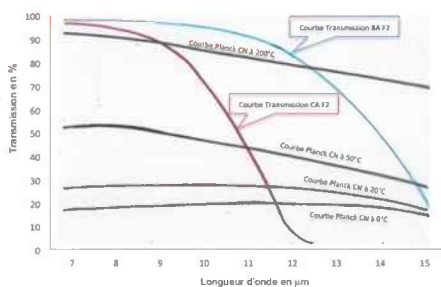
La température de la fenêtre est le $L_{\text{fenêtre}}$ dans l'équation radiométrique

$$L_{\text{mesuré}} = L_{\text{objet}} * \tau_{(\lambda)} + L_{\text{fenêtre}} * \epsilon_{(\lambda)}_{\text{fenêtre}} + L_{\text{environnement}} * \rho_{(\lambda)}_{\text{fenêtre}}$$

La mise en température des fenêtres est très délicate et la connaissance précise ainsi que de l'uniformité des valeurs de températures est incertaine.

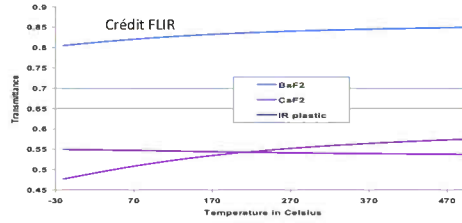
Pour ces raisons, l'influence de ce paramètre est simulée par l'utilisation des fonctionnalités du logiciel FLIR

Température de la cible



Les courbes de Planck et la loi de Wien montrent que lorsque la température de la cible augmente, la distribution d'énergie selon les longueurs d'onde varie.

La transmission des fenêtres sera donc influencée par la température de la cible



La température de la cible est le L_{objet} dans l'équation radiométrique

$$L_{\text{mesuré}} = L_{\text{objet}} * \tau_{(\lambda)} + L_{\text{fenêtre}} * \epsilon_{(\lambda) \text{ fenêtre}} + L_{\text{environnement}} * \rho_{(\lambda) \text{ fenêtre}}$$

5. Résultats

Valeurs de transmittances mesurées

Les deux caméras utilisées sont de technologies différentes et ont entre elles, quelques variations faibles sur leurs bandes spectrales

Les résultats obtenus sont sur la base de 5 mesures par caméra soit 10 mesures au total dont la moyenne en est extraite ainsi que la dispersion par l'expression de l'écart type

	Transmittance mesuré 90° / dispersion	Transmittance mesuré 45° / dispersion
Fenêtre Ca F2	0,48/0,02	0,46 / 0,02
Fenêtre Ba F2	0,82/0,01	0,79/ 0,02
Fenêtre organique polyIR [®]	0,64/0,01	0,63 /0,01
Fenêtre Plastique 1 couche	0,83/0,03	0,80 / 0,03
Fenêtre grillage nid d'abeille	0,62/0,05	0,23 / 0,08

Fenêtre CAF2

La transmittance grise est faible soit 0,48 et la lecture avec un angle de 45° ne modifie pas fondamentalement la valeur

Fenêtre BAF2

La transmission est bonne et comme pour la fenêtre en CAF2, la lecture avec un angle de 45° ne modifie pas significativement les mesures

Fenêtre organique PolyIR[®]

La valeur de transmittance de 0,65 est médiane pour une épaisseur de 0,38mm .Le différentiel avec la vue à 45° est faible ainsi que la variance des mesures.

Fenêtre Plastique

Transmittance est forte pour une l'épaisseur. Le différentiel avec la vue à 45° devient plus important ainsi que la variance des mesures

Fenêtre Grillage

La valeur intermédiaire de transmittance de 0,62 est presque suffisante mais il est impossible de l'utiliser avec un angle de vue de 45°

Il est à noter la grande variance des mesures

Valeurs des réflexions grises mesurées

Pour des questions de mode opératoire (utilisation du mode mesure en rayonnement), seule la caméra A 325 et le logiciel RESEARCHER ont été utilisés

	Réflectance mesuré à 90°	Dispersion
Fenêtre Ca F2	0,02	0,009
Fenêtre Ba F2	0,01	0,005
Fenêtre PolyIR®	0,02	0,005
Fenêtre Plastique 1 couche	0,01	0,007
Fenêtre grillage nid d'abeille	0,06	0,009

Ces mesures montrent des facteurs de réflexion proche de zéro avec une influence nulle ou négligeable sur les résultats.

A noter les valeurs très basses sur les fenêtres du marché.

Les valeurs obtenues sur le plastique sont en correspondance avec les valeurs d'émissivité du plastique quand celui-ci est suffisamment épais pour se comporter comme un objet opaque. Dans ce cas, l'émissivité est comprise entre 0,9 et 0,95 soit un facteur de réflexion de 0,05 à 0,1

Influence de la température de la fenêtre et de la température de la cible

Les mesures ont été effectuées devant des scènes thermiques dont les températures sont proches des valeurs initialement choisies

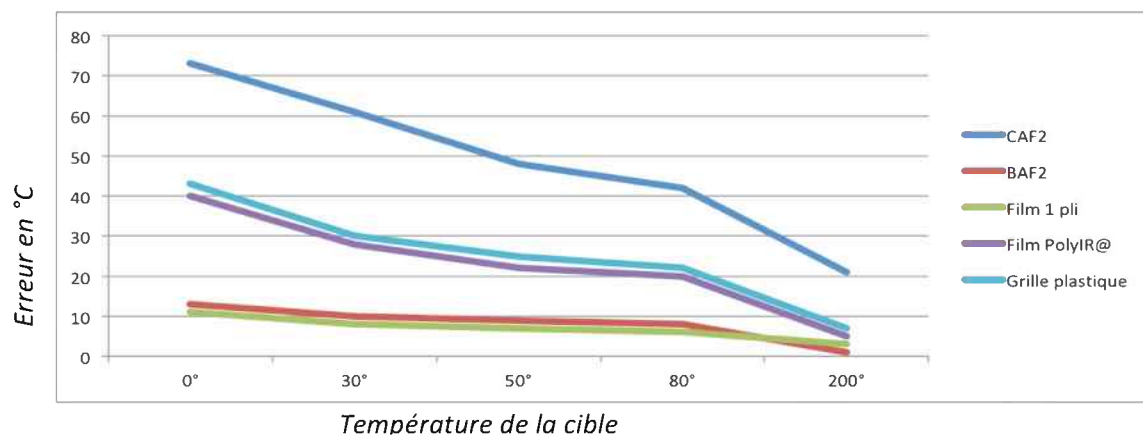
Chaque valeur calculée (résultat de la moyenne de 5 points de mesures) correspondant un scénario où pour chaque fenêtre et chaque température de cible, il est relevé :

- La température directe sans fenêtre de la cible soit la température vraie de la cible
- La température de la cible à travers la fenêtre dont le résultat est compensé en transmission et pour une température de fenêtre de 20° dans le logiciel (20° est la température de la pièce au moment des mesures)

Les compensations de température de la fenêtre à 40° et 60 ° sont effectuées par logiciel et permettent de quantifier l'influence de la température de la fenêtre par le delta T° calculé. Par conséquent, l'erreur est générée par la non prise en compte de celle ci.

Les résultats sont présentés sous forme de 3 courbes :

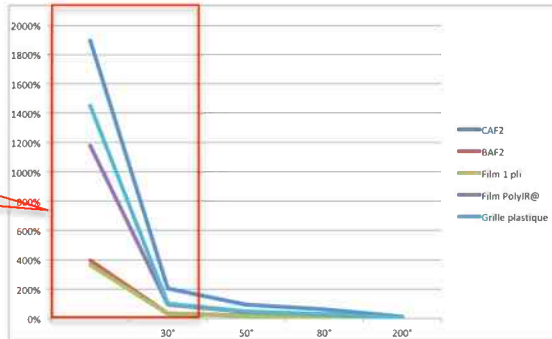
Erreur en °C par l'influence d'une variation de 40° de la température de fenêtre en fonction de la température de la cible



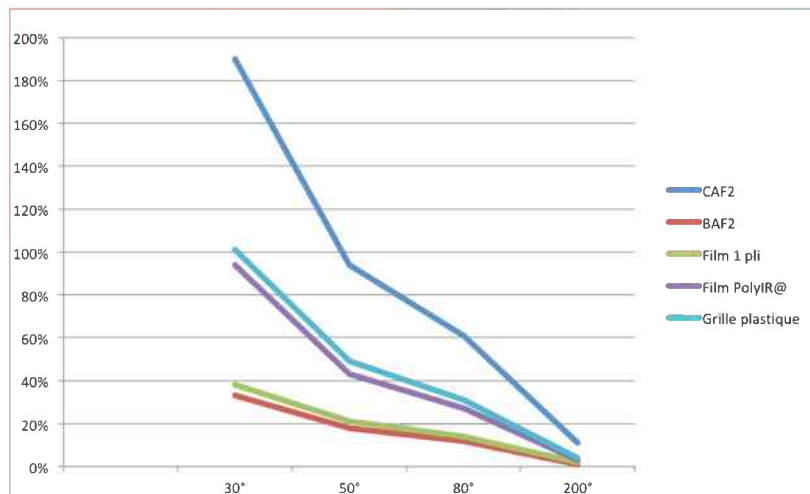
Erreur exprimée en pourcentage du rapport de la variation de 40°C par rapport à la valeur de la cible

Cas de cibles à basse température

Cette zone montre une impossibilité ou une réelle difficulté à effectuer des mesures sur des cibles de bases températures à travers une fenêtre infrarouge



Cas pour les cibles à températures supérieures à 30°C



6. Conclusion

Il est nécessaire de prendre en compte différents paramètres afin d'évaluer les erreurs de mesures dans le cas d'utilisation d'une fenêtre IR avec une caméra de thermographie

Le choix des essais plutôt qu'une étude théorique est imposé par la difficulté de connaître et maîtriser avec précision les paramètres physiques pour chaque longueur d'onde (comme par exemple pour le coefficient d'absorption).

Cette étude ne sera valide que pour la stricte bande spectrale (7,5 à 14 µm) , utilisée par les caméras de ces essais. Les valeurs déterminées dans ces essais sont des valeurs grises qui n'ont de sens que pour les caméras qui utilisent la bande spectrale ci dessus.

Les fenêtres du marché, soit en CAF2 et en BAF2 montrent des facteurs de transmission différents et ces variations impliquent des utilisations différenciées. Le cas de la fenêtre grille nid d'abeille devient pertinent dans les situations ou une étanchéité de la cellule n'est pas nécessaire. Elle présente des caractéristiques médianes mais impose des contraintes de visée.

Les fenêtres à base de film PolyIR® possède des caractéristiques de transmission médiane sans contraintes de visée, mais sa faible épaisseur de 0,38 mm limite mécaniquement les applications.

L'étude montre que quelque soit la fenêtre, la composante réflexion de celles ci pourra être négligée car proche du % .

Effet de la transmittance

La finalité de la fenêtre IR est de rendre possible la localisation (mode qualitatif) ou la mesure (mode quantitatif) d'un évènement thermique à travers une paroi étanche ou protectrice.

Si la réflexion est négligée, il ne restera que le rayonnement émis par cible et pondéré par la transmittance et en contre partie, l'émission propre de la fenêtre sera un paramètre inutile qui perturbera les résultats.

Dans ces conditions, l'équation radiométrique se simplifie encore et il ne reste que :

$$\text{avec } \tau + \varepsilon = 1 \quad \text{et} \quad \varepsilon = 1 - \tau$$

$$L_{\text{mesuré}} = \underbrace{L_{\text{objet}} * \tau}_{\text{Terme 1}} + \underbrace{L_{\text{fenêtre}} * (1 - \tau)}_{\text{Terme 2}}$$

Seul l'évènement thermique L_{objet} intéresse dans l'équation radiométrique simplifiée

Pour une bonne mesure de L_{objet} et indirectement de la température de la cible, la condition est que le **terme 1** doit être grand devant le **terme 2**

En conséquence, plus la transmission sera élevée, moins la mesure sera affectée par la température de la fenêtre IR.

Le scénario où L_{objet} est très grand (température élevée de l'évènement thermique) répond aussi au condition d'une bonne mesure. Quand la cible est à 200°C, Les essais valident ce scénario.

Un faible facteur de transmission - Les fenêtres en **CAF2** -

En dehors du scénario où le **terme 1** est grand avec une haute température de la cible, la mesure est difficile ou très difficile

L'utilisation de ces fenêtres à faible facteur de transmission impose une thermographie en mode qualitatif où toute mesure est exclue. Des précautions seront particulièrement à prendre quand les cibles seront à basse température.

Un grand facteur de transmission - Les fenêtres en **BAF2** ou film plastique avec mono-ply

Le terme 1 est naturellement élevé et rendent les mesures possibles .Il sera tout de même difficile d'effectuer des mesures sur des cibles de basse température car celle-ci abaisse la valeur du **terme 1**.

Le film plastique, par sa très faible épaisseur (quelque dizaine de μm) et ses faibles caractéristiques mécaniques, est limité à des applications de protections de caméra

Un facteur de réflexion intermédiaire - Fenêtre en nid d'abeille ou film organique **PolyIR**[®]

Les mesures restent difficiles avec ce type de fenêtre. Elle reste toutefois idéale pour des thermographies en mode qualitatif. En revanche l'influence de l'angle de visée est important pour le la fenêtre **Nid d'abeille** et interdit toute thermographie même qualitative avec un angle en dehors de la normale.