

Mesure des rayonnements de grande longueur d'onde

Myriam Dauzat ¹, Dominique Flura ²

Résumé : Nous présentons trois types d'appareils qui utilisent la mesure de grandes longueurs d'onde (aux environs des 10 μm) pour des mesures de rayonnement atmosphérique ou des mesures de températures sans contact. Une description sera suivie des précautions à prendre lors des mesures puis d'exemples d'utilisation dans nos recherches. Cet article se veut pratique et l'occasion d'échanges de méthodes ou d'impressions, et surtout il a pour but de sensibiliser les utilisateurs des températures de surface à l'échelle du couvert mais aussi de la plante aux influences possibles de l'environnement sur les mesures.

Mots clés : Pyrgéomètre, rayonnement atmosphérique, température radiative, thermomètre infrarouge, caméra infrarouge, émissivité, température de réflexion.

Introduction

Tout corps émet un rayonnement dont la longueur d'onde du pic d'émission est liée à sa température en Kelvin selon la loi de Wien $\lambda_{\text{max}} = \frac{2897.10^{-6}}{T_k}$. Nous voyons que pour des

températures autour des 300 K, nous obtenons une longueur d'onde de 10 μm . Pratiquement toutes les surfaces naturelles terrestres ainsi que l'atmosphère vont émettre un rayonnement aux environs de cette longueur d'onde. Selon la loi de Stefan Boltzman la puissance dissipée par ce rayonnement dépend de leurs températures toujours en Kelvin par :

$$F(T) = \varepsilon \sigma T^4 \text{ avec } \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ F(T) s'exprime en W/m}^2.$$

L'émissivité ε est une caractéristique de surface du corps rayonnant ; pour un corps noir elle sera de 1 (le corps noir est un objet idéal qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit et dont le rayonnement qu'il émet ne dépend que de sa température). L'émissivité d'un matériau est le rapport entre l'énergie qu'il rayonne et celle d'un corps noir qui rayonnerait à la même température c'est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1 (**cf. §3**). Les instruments que nous allons décrire utilisent la mesure de ce rayonnement.

1. Le pyrgéomètre

C'est un radiomètre hémisphérique qui sert à mesurer le flux radiatif infrarouge incident à la surface de la terre dans toutes les directions (angle solide de 2π), flux dû au rayonnement tellurique d'origine atmosphérique ou à celui émis par le sol si l'on retourne le capteur. L'élément sensible est une thermopile sensible au rayonnement infrarouge. Le rayonnement inférieur à 4 μm est réfléchi ou bloqué par la coupelle qui de ce fait va s'échauffer et générer un rayonnement dont il faudra tenir compte dans la mesure. Kipp et Zonen, dans son modèle CGR4, par construction évacue cette chaleur dans le corps de l'instrument. Pour les capteurs

¹ Inra UMR 759 LEPSE 34060 Montpellier, ☎ 04 99 61 24 61 ✉ myriam.dauzat@supagro.inra.fr

² Inra UMR 1091 EGC Environnement et grandes cultures F-78850 Thiverval Grignon ☎ 01 30 81 55 21

✉ Dominique.Flura@grignon.inra.fr

Eppley, une mesure de la température du dôme est effectuée par une thermistance. Prenons pour commencer le cas plus simple du Pyrgéomètre Kipp et Zonen CGR4 (**figure 1**). Le capteur est une thermopile qui convertit la différence de température entre l'élément sensible et celle du corps de l'appareil en un signal de tension proportionnel au rayonnement reçu. Une mesure de la température du corps de l'appareil nous permet de calculer le rayonnement.

$$R_a = U/S + \sigma T_c^4$$

R_a : rayonnement atmosphérique en W/m^2 ,

U : tension de sortie de la thermopile en μV

S : coefficient de sensibilité ou coefficient d'étalonnage en $\mu V/Wm^2$,

σ : constante de Stefan Boltzman,

T_c : température du corps de l'instrument en Kelvin.

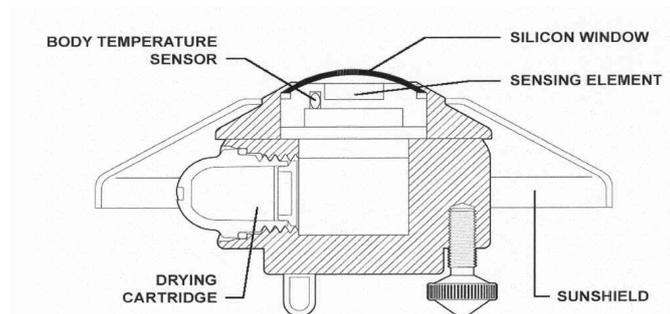


Figure 1 : Schéma d'un pyrgéomètre CGR4 Kipp et Zonen

Pour mesurer le rayonnement atmosphérique avec le pyrgéomètre Eppley, le constructeur nous propose deux solutions. La première, utilise simplement la sortie compensée en température donnant $R_a = U_{compensé}/S$; cette solution séduisante est à rejeter pour son manque de précision. La seconde solution utilise la même formule que celle décrite précédemment pour le CGR4. Le problème est que le rayonnement dû à la température de la coupelle n'est pas retranché. Albrecht et Cox propose d'introduire la température du dôme suivant $R_a = U/S + \sigma T_c^4 - K \sigma (T_d^4 - T_c^4)$ avec T_d température du dôme, le coefficient K serait égal à 3,5. J.-Ph. Morel et J. Olivieri (2007) font une critique détaillée et ils proposent une autre formule tenant compte de la température de la coupelle avec des modifications de l'instrument :

$$R_a = U/S (1 + K1 \sigma T_c^3) + K2 \sigma T_c^4 - K3 \sigma (T_d^4 - T_c^4). \text{ K1, K2, K3 constantes}$$

1.1 Spécification du pyrgéomètre CGR4 de Kipp et Zonen

La gamme spectrale s'étend de 4,5 à 42 μm , le temps de réponse est inférieur à 18 s, la non linéarité inférieure à 1% dans la gamme de -250 à + 250 W/m^2 . La dépendance en température de la sensibilité est inférieure à 5% pour une variation de température de - 40 à 40 °C et inférieure à 10 % pour une variation de température allant de - 40 à 80°C. L'erreur d'inclinaison inférieure à 2 %.

1.2 Installation d'un pyrgéomètre

On installera l'instrument de niveau à une distance minimale de dix fois la hauteur d'un éventuel obstacle (arbre, mur...). Une distance de 100 m maximum sera observée entre l'instrument et l'acquisition de donnée qui devra avoir une résistance interne élevée supérieur

à un MΩ. Une ventilation est nécessaire pour éviter les dépôts de rosée (l'eau absorbe l'infrarouge) et éviter un échauffement excessif de la coupelle (**figure 2**).



Figure 2: *Pyrgéomètre Eppley muni d'une ventilation*

1.3 Maintenance

Une coupelle sale donnera des valeurs erronées, pour cette raison la coupelle d'un appareil en plein champ sera lavée à l'eau déminéralisée. Nous Vérifions régulièrement la mise de niveau. Le dessicant doit être vérifié avant et après chaque installation ou tous les 6 mois dans le cas d'une installation fixe. Un étalonnage tous les cinq ans est nécessaire, tous les deux ans voire tous les ans pour une plus grande précision. Pour mettre en évidence d'éventuels défauts on effectue une inter comparaison de capteurs par ciel nuageux.

1.4 Valeurs typiques de rayonnement atmosphérique et importance dans le bilan radiatif

Température ambiante	Rayonnement atmosphérique W/m ²	
	Ciel couvert	Ciel clair
- 20°C	230	80
0°C	315	165
+ 30°C	480	330

Tableau 1 : *variation du rayonnement atmosphérique en fonction de la température ambiante*

On notera **figure 3** que le rayonnement atmosphérique est quasi constant et qu'intégré sur 24 heures il est comparable au rayonnement global. Les courbes qui proviennent d'une expérimentation au Niger avec une atmosphère humide et une température élevée correspondent bien avec les ordres de grandeurs du **tableau 1** sur lequel on remarquera que le rayonnement atmosphérique dépend de la température et de la couverture nuageuse.

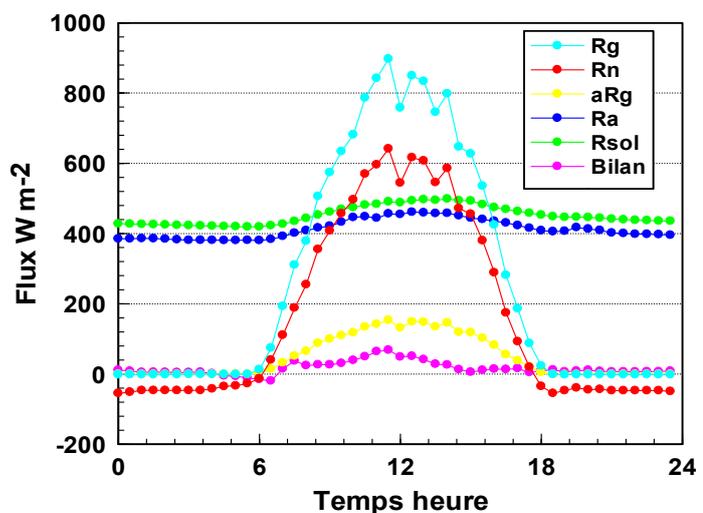


Figure 3 : *relation entre les termes du bilan radiatif*

La vapeur d'eau absorbant le rayonnement aux environs des 6 μm , une augmentation de l'humidité de l'air va accroître cette absorption et de ce fait le rayonnement atmosphérique. Le bilan radiatif qui est la somme algébrique des rayonnements avec en positif les rayonnements reçus par le sol et en négatif ceux qui le quittent, peut s'écrire sous la forme : $(1-a) R_g - R_{\text{sol}} + (1-\varepsilon) R_a - R_n = 0$ (Tuzet A., 2008). Chaque courbe de la **figure 3** est le résultat de mesures réalisées à partir d'instruments indépendants les uns des autres. La courbe notée « bilan » représente la somme des erreurs de mesures. Si toutes les mesures avaient été parfaites le bilan radiatif aurait été bouclé et égal à zéro.

2. Mesure de température radiative

C'est une mesure de température sans contact. Puisqu'un corps émet une énergie radiative en fonction de sa température, nous allons mesurer cette énergie et en déduire la température en suivant la formule $E = \varepsilon \sigma T^4$. Cette énergie est émise sous la forme d'un rayonnement de grande longueur d'onde. Le thermomètre infrarouge mesure le rayonnement dans cette gamme de longueur d'onde en général 8-14 μm et fait la conversion en température. La plupart des surfaces naturelles ont une émissivité supérieure à 0,9. Par exemple, l'émissivité d'un sol limoneux nu sera d'environ 0,91 celle d'un gazon 0,98. Le thermomètre infrarouge recevra le rayonnement émis par la surface plus la réflexion du rayonnement atmosphérique (ici les énergies s'ajoutent, contrairement aux températures), soit

$$\varepsilon\sigma T_s^4 + (1-\varepsilon)R_a \text{ que le thermomètre ne sait décomposer et prendra pour } \varepsilon\sigma T_s^4.$$

Deux questions se posent, il nous faut connaître l'émissivité de la surface à mesurer ainsi que le rayonnement atmosphérique pour recalculer la température de la surface. Couramment on néglige l'émissivité de la surface et la réflexion du rayonnement atmosphérique, mais il faut accepter une erreur sur la mesure pouvant atteindre 3 degrés. On pourra lire Olioso (1995) pour plus de précision sur le sujet et Idso (1981) pour une prise en compte du rayonnement atmosphérique. Une façon simple de connaître l'émissivité de la surface à mesurer est de coller un patch dont on connaît l'émissivité, sur cette surface et d'attendre l'équilibre thermique entre les deux. On fait ensuite une mesure de température des deux surfaces. La différence de température mesurée entre les deux est due à la différence d'émissivité que l'on pourra calculer (cf. § 3.3).

2.1 Caractéristique des thermomètres infrarouges

Il existe des thermomètres infrarouges portables sur batterie et à mémoire, d'autres nécessitent un enregistreur, certains possèdent une mesure de leur température interne pour une éventuelle correction, d'autres ne sont que des instruments de contrôle.

2.2 Précautions à prendre lors de la mesure

Bien que l'erreur de mesure due à la température interne de l'instrument soit souvent faible (**tableau 2**), il convient pour les instruments portables de les laisser s'équilibrer en température avec l'environnement et de protéger du rayonnement solaire les instruments à poste fixe. Comme tous les instruments ayant une optique, celle-ci devra rester propre. Une fois connues les erreurs dues à l'instrument, à l'émissivité et à la composante atmosphérique on doit s'interroger sur l'objet à mesurer et l'utilisation de la mesure. Prenons en exemple le cas de la mesure de température d'un couvert de blé. Comparons une mesure à la verticale avec mesure à l'oblique. Avant la fin du tallage du blé (propriété des graminées à produire plusieurs tiges à partir d'une plantule), la visée verticale intègre une contribution importante du sol. Au moment du développement de l'épi dans la tige, l'épiaison, la contribution du sol

dans la visée verticale devient faible mais les feuilles visées seront celles qui reçoivent le plus de soleil à l'inverse de la visée oblique pour qui la contribution des feuilles à l'ombre sera importante. Quelle utilisation fera-t-on de la mesure ? Une étude de stress hydrique ? Une étude de caractérisation des températures pour des cultures aux architectures différentes ? On s'aperçoit qu'il n'y a pas de solution unique. Dans un cas, on prendra la solution qui donne des mesures les plus homogènes alors que dans l'autre, c'est la dispersion des températures qui nous intéresse.

Mesure de température		commentaire
Echelle	- 40°C à 100°C	Prendre la gamme la plus petite
Précision	± 0,5°C	Il s'agit de la précision sur la mesure d'un corps noir
Effet de la température	± 0,1°C	
Considération de l'optique		
Bande spectrale	8 à 14 µm	
Visée	Visualisation de la cible par Led	Eviter les lasers pour les portables
Champ de visée (focus)	Variable de 4° à 20°	Souvent donné comme le rapport de la distance sur le diamètre de la cible ex 10/1
Général		
Signal de sortie	10mV/°C	
Emissivité	Ajustable de 0,1 à 0,99	
Environnement	Humidité relative 99 % sans condensation	Pour poste fixe à l'extérieur voir le modèle adapté supportant la pluie

Tableau 2 : *Caractéristiques d'un thermomètre infrarouge*

2.3 Exemple d'utilisation de cette mesure

Un exemple assez ancien, mais didactique, d'utilisation de cette mesure de température radiative est celle du CWSI (crop water stress index) indice de stress hydrique d'un couvert (Katerji, 1988). Le CWSI sert au déclenchement de l'irrigation et il est défini comme $(T_c - T_{cmin}) / (T_{cmax} - T_{cmin})$ avec T_c la température du couvert, T_{cmin} la température du même couvert en confort hydrique et T_{cmax} la température maximum qu'aurait ce même couvert s'il était complètement sec. Les températures maxima et minima peuvent être obtenues par modèle. La température minimum peut aussi être obtenue par une simple mesure du couvert dans une partie de la parcelle que l'on gardera en confort hydrique. Pour minimiser les erreurs, les mesures se font au même moment.

3. La caméra infrarouge (IR)

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu [-273,15 degrés Celsius ou 0° Kelvin], émet un rayonnement dans l'infrarouge. Une caméra infrarouge mesure non pas une température mais une énergie rayonnée. Plus la température d'un corps est élevée, plus son énergie rayonnée est élevée.

La caméra thermique présente ici l'avantage de capter ce rayonnement, de le quantifier et de le restituer sous forme d'une image « visible » (vidéo) qui associe des couleurs à différentes intensités de rayonnements. Par le paramétrage de la caméra, l'opérateur va affecter, souvent de façon automatique, des températures à chaque couleur on lira alors des températures à distance, sans contact et de façon non destructive.

Avant d'utiliser un tel appareil, il faut savoir qu'à travers le paramétrage, l'opérateur est responsable des températures affichées, en effet, le calculateur de la caméra est passif : il est donc moins facile qu'il n'y paraît de se servir d'un tel instrument.

Nous utilisons depuis peu au LEPSE, une caméra Infrarouge B20HSV (Flir System), d'échelle spectrale $7,5 << 13 \mu\text{m}$, équipée d'un détecteur de type 320×240 pixels, de résolution thermique théorique de : $0,05^\circ\text{C}$.

Lors de l'achat, l'objectif scientifique était de déceler des comportements stomatiques différents suivant les génotypes et en fonction des conditions environnementales chez *Arabidopsis thaliana* cultivé en chambre de culture, mais aussi chez le maïs, cultivé en serre ou au champ.

Au cours des premières mesures, nous nous sommes aperçus que plusieurs précautions sont à prendre avant d'obtenir des résultats fiables. Il est par exemple important, comme pour l'utilisation d'un thermomètre IR, de déterminer l'émissivité et la température de réflexion avant toute mesure et de considérer l'environnement de travail : chambre, serre, extérieur, soleil ou ciel nuageux... Nous donnerons ici des conseils pour la mesure de ces 2 paramètres et nous présenterons des astuces pour mesurer la température ambiante et des exemples d'erreurs à éviter.

3.1 L'émissivité

Définition

L'émissivité (ε) est la capacité d'un corps à émettre un rayonnement.

$$\varepsilon = \frac{\text{rayonnement émis par un corps}}{\text{rayonnement émis par un corps noir}} \quad \text{les 2 corps étant à la même température.}$$

L'émissivité varie avec la nature du matériau (sol, végétal...), la température, la longueur d'onde, l'état de surface, l'angle, et elle est comprise entre 0 et 1. Ainsi, chez un corps noir, qui absorbe et réémet toute l'énergie, $\varepsilon = 1$

Détermination de l'émissivité à l'aide d'une caméra IR

Plusieurs méthodes existent pour déterminer l'émissivité :

- la première est d'utiliser les valeurs d'émissivité fournies en annexe ; cette méthode est à utiliser avec précaution car toute généralisation est source d'imprécision.
- la seconde utilise la méthode par référence à la Norme ASTM E1933-99A (Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers) :

- on applique sur une feuille de la plante, 1 à 2 cm² d'un produit dont l'émissivité est connue³.

☞ La plante ne doit alors pas transpirer (mesures la nuit). On limitera au maximum les flux convectifs pour cette mesure : on pourra utiliser une cage en cellofrais autour de la plante et il faudra veiller au paramètre de transmission des matériaux, ou bien, ne pas viser au travers du cellofrais.

- on suppose alors que la température du produit étalé (référence) et celle de la plante sont les mêmes.

- on mesure alors la température sur la zone de référence, avec par exemple, $\epsilon = 0,95$ (émissivité du produit appliqué).

- on obtient $T_{\text{réf}}$ à partir du rayonnement reçu $= \epsilon\sigma T_{\text{zone}}^4 + (1-\epsilon) R_{\text{réfléchi}}$. Cette information sera directement transmise par la caméra.

- on pointe le calculateur de la caméra sur la zone à déterminer. On ajuste alors l'émissivité jusqu'à obtenir $T_{\text{inconnue}} = T_{\text{réf}}$. Bien sûr $R_{\text{réfléchi}}$ doit rester constant car il intervient et doit être identique dans les deux mesures.

- on lit alors l'émissivité indiquée.

☞ Il faut tenir compte de la température de réflexion (température apparente réfléchie), donc de notre environnement afin d'avoir une mesure plus fiable et précise. C'est pourquoi, on déterminera sur la même image, la température de réflexion (§3.3).

Pour cette méthode, la température de réflexion doit être la plus éloignée possible de la température de surface étudiée (minimum 15 à 20°C d'écart).

Enfin, on peut mesurer l'émissivité au spectroradiomètre : c'est l'idéal si on place l'appareil près de la plante afin que les conditions de mesure soient identiques. Par ailleurs, cet appareil n'est pas toujours disponible sur les centres Inra et il est souvent très utilisé par exemple en télédétection.

Influence de l'émissivité

Hypothèse : peu d'influence de l'émissivité entre 0,9 et 0,98 pour une température de réflexion voisine de la température ambiante (par exemple en chambre de culture).

On observera les résultats au § 3.3, couplés aux variations de température de réflexion.

3.2 Détermination de la température de réflexion ou température apparente réfléchie (Norme ASTM E1862-97)

Méthode

On place une feuille de papier aluminium ménager froissé puis défroissé grossièrement, côté brillant près de la surface à mesurer. Attention, la feuille de papier devra être mise au dernier moment pour éviter tout risque de condensation et de dépôt d'humidité sur la feuille.

Cette feuille est un réflecteur parfait (hypothèse), sur lequel se réfléchit un corps noir équivalent à un environnement moyen homogène et diffus. On règle alors l'émissivité dans les paramètres de la caméra à 1 ($\epsilon = 1$).

³ Différents produits peuvent aider à la détermination de l'émissivité :

tipex	0.93
Rouleau adhésif 3M super 33++	0.95
Rouleau adhésif 3M (autosoudable)	0.9

On récupèrera alors tout ce qui est réfléchi.

On fait une image de ce papier et à l’aide du logiciel ou directement sur la caméra, on calcule sa température moyenne sur une zone de ce papier la plus large possible.

On entre alors cette température réfléchie manuellement dans les paramètres du calculateur. Elle deviendra active pour tous les objets dont l’émissivité sera inférieure à 1.

sur une pelouse, la nuit	sous un arbre (été, ombre)	chambre de culture	Extérieur soleil (jour)	Serre en été
TR= -1.1	22.4	27	-11	25

Tableau 3 : Exemples de températures de réflexion (°C) obtenues dans différents environnements

☞ La température de réflexion peut atteindre -30 à -40°C par temps très dégagé, sans pollution atmosphérique, ni évaporation (hiver, temps sec).

La température de réflexion dans un milieu fermé se rapprochera de la température ambiante.

3.3 Variation de la température de surface pour différentes émissivités et températures de réflexion (interaction)

	AR01 : détermination de la température de surface d’une pelouse AR02 : détermination d’une température de réflexion AR03 : détermination d’une température ambiante		
	Détermination de la température (°C) de surface de la zone AR01		
Temp de réflexion	$\epsilon = 0.9$	$\epsilon = 0.95$	$\epsilon = 0.98$
-40°C	15.7	13.6	12.4
-10	13.7	12.6	12
0	12.8	12.2	11.8
20	10.6	11.1	11.4

Tableau 4 : exemples de variation de la température de surface (°C) pour différentes émissivités et températures de réflexion

L'émissivité n'a pas une grande influence sur la mesure si la température de réflexion est proche de la température ambiante.

La température de réflexion sera plus influente que l'émissivité (pour des émissivités fortes), en fonction de l'environnement de la mesure (extérieur, chambre, temps couvert ou non).

3.4 Influence de l'angle de visée

La température de surface est théoriquement constante jusqu'à un angle de 45°.

De plus, la caméra permet d'éliminer le problème de l'angle de visée que l'on avait avec le thermomètre infrarouge. Si on effectue la mesure sur une plante et que l'on vise un peu de sol (**images § 3.6**), celui-ci apparaîtra d'une couleur différente. Il est alors possible d'en faire abstraction dans la température moyenne de la plante.

3.5 Influence de l'ambiance sur les mesures : quelques exemples concrets

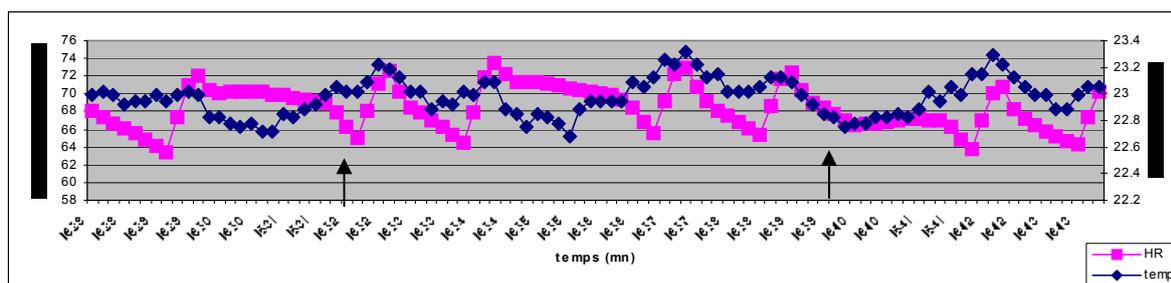
Variation des températures de surface selon le climat ambiant d'une chambre de culture

Pour illustrer l'influence de l'environnement sur les températures de surface de plante, voici les résultats d'une expérience très simple : dans une chambre de culture, un pot d'*Arabidopsis thaliana* est pris en photo toutes les minutes, toujours à la même position dans la chambre. Nous visualisons ici les effets de la régulation climatique sur la plante grâce aux images de rayonnement thermique.

On observe donc des écarts de température pouvant aller jusqu'à 6°C pour une même plante à quelques secondes d'intervalle. Ces écarts sont plus grands que l'amplitude thermique donnée par le capteur de la chambre climatique (CS215, Campbell). Cela est dû à l'effet des **brumisateurs** qui ont un effet immédiat sur la plante. Il n'y a pas d'écart entre la température de la plante et celle du papier à cigarette.

On voit ici une des difficultés de l'utilisation d'une caméra infrarouge pour déterminer la température foliaire de façon fiable et reproductible en milieu contrôlé. Ici, une solution pour réaliser les mesures est d'arrêter la régulation en humidité : les plantes ne seront alors plus aux conditions souhaitées (consigne de VPD, Vapour Pressure, Deficit non respectée). Le déficit de pression de vapeur représente l'écart entre la pression de vapeur saturante et la pression partielle de vapeur d'eau ; c'est-à-dire que c'est l'écart entre la quantité de vapeur d'eau dans l'air et celle qu'il y aurait à saturation.

Les plantes sont moins sensibles à la régulation en température seule. L'effet sur leur température est beaucoup moins perceptible, même s'il existe quand même.



Visualisation des données météo pendant les prises de photos

Images IR : Prise d'images toutes les minutes

Le papier à cigarette nous indique la température ambiante sur chaque image IR

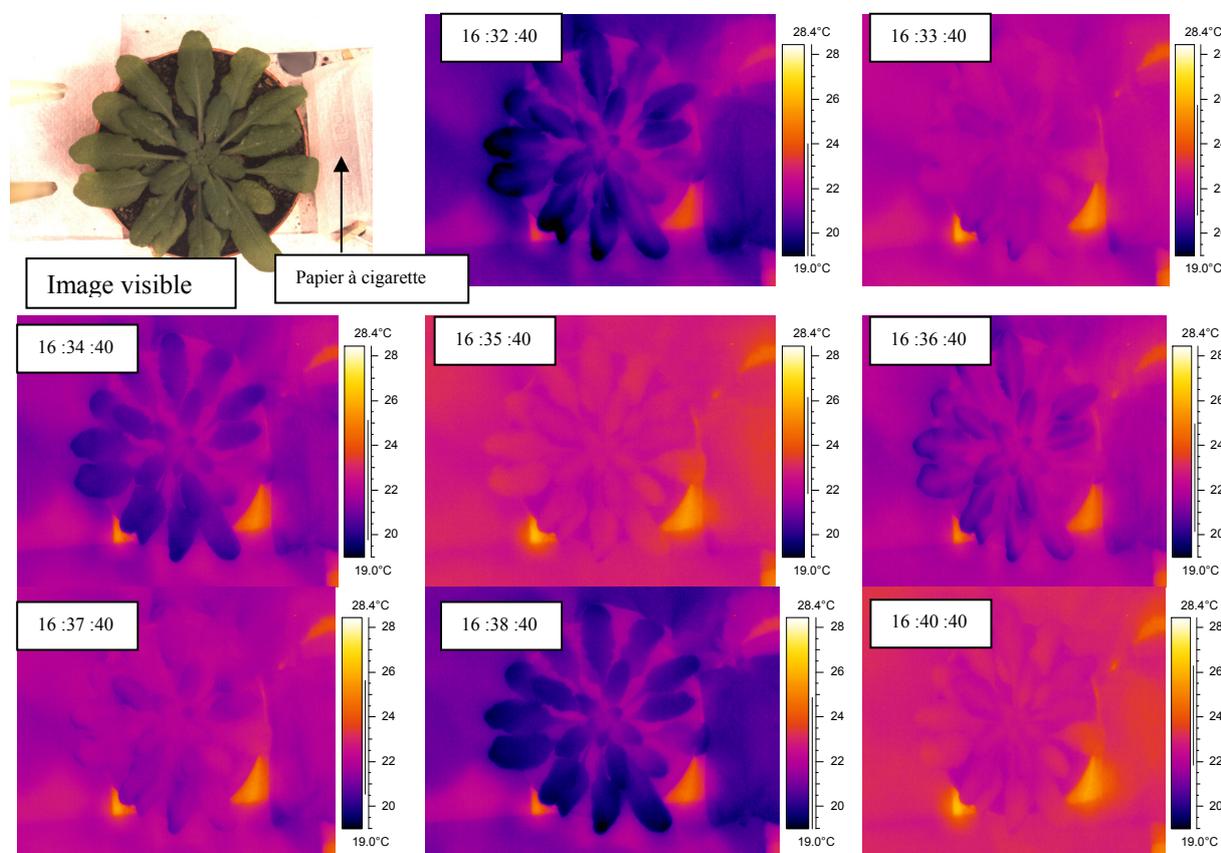


Tableau 5 : Influence du climat ambiant sur les températures de surface d'une plante d'Arabidopsis thaliana dans une chambre de culture.

Influence spatiale d'une chambre de culture sur la température de réflexion

Nous avons cherché à connaître la variabilité spatiale de la température de réflexion dans une chambre de culture, pour cela nous avons pris une mesure, environ tous les 50 cm, dans le sens de la longueur de la chambre et tous les 20 cm dans le sens de la largeur.

Les conditions climatiques dans la chambre étaient les suivantes :

Température air: 23,7°C, humidité relative de l'air: 60 %, PAR (rayonnement photosynthétiquement actif): 170 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$

La chambre de culture dispose d'un support central supportant 14 plateaux percés de 36 alvéoles.

Nous avons pris les mesures tous les 2 plateaux et respectivement sur les alvéoles 1, 15, 36.

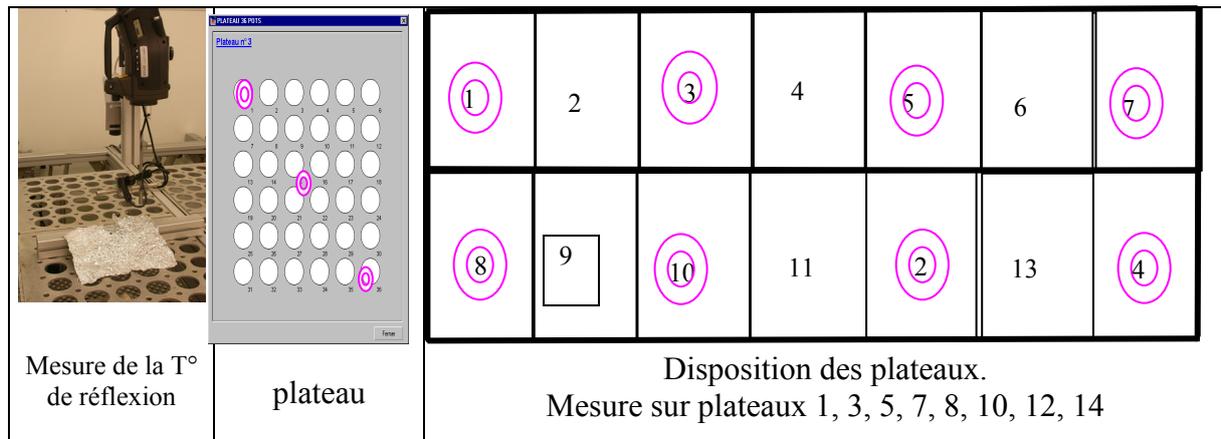


Figure 4 : dispositif pour la mesure de température de réflexion dans une chambre de culture

Les résultats

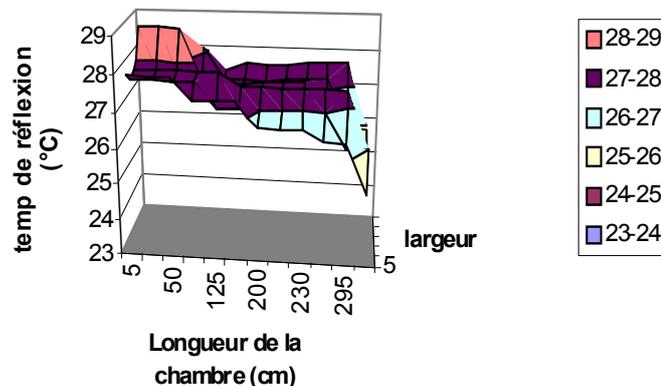


Figure 5 : Distribution spatiale des températures de surface sur l'ensemble de la surface de la chambre (120 cm de hauteur/sol)

On constate une hétérogénéité des températures de réflexion sur la surface de la chambre de culture, due en partie aux parois de la chambre (parois présentes au niveau des températures les plus basses, à droite du graphique, pas de paroi proche sur la gauche de la chambre).

Même si cet écart peut avoir des conséquences minimales sur les températures de surface des plantes, il mérite d'être pris en compte sur chacune des images de plantes individuelles. En effet, au cours de phénotypage, de faibles variations de températures peuvent différencier deux génotypes ou deux niveaux de stress.

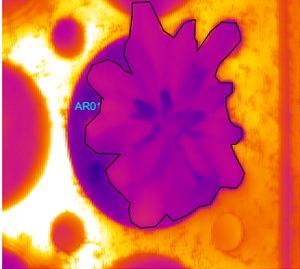
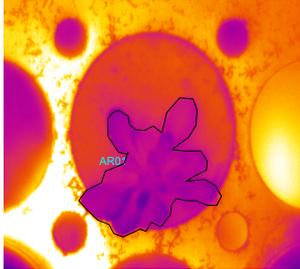
Prenons l'exemple du § 3.6, un écart de température de réflexion de 3°C influencera la mesure de la température moyenne de surface de la plante témoin de 0,1°C.

On voit ici l'importance de prendre en compte tous les paramètres influant sur les mesures.

3.6 La caméra IR peut-elle aider à la détection de stress hydrique ?

Voici 2 exemples d'images de plantes, l'une témoin et l'autre stressée, les conditions environnementales sont identiques pour les 2 plantes : température = 21 à 22°C, Vapour Pressure Deficit (VPD)= 1.2kPa, PAR = 170 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$. En revanche, les teneurs en eau du sol sont bien différentes : la plante témoin est cultivée avec 4gr d'eau/gr de sol sec (sol

à 40 % d'humidité), et la plante stressée est cultivée avec 2gr d'eau/gr de sol sec (soit un sol à 20 % d'humidité), le sol est un mélange terreau/terre végétale (50/50). Ces conditions sont suffisantes pour faire apparaître un stress sur les génotypes que nous étudions. La plante témoin et la plante stressée sont du même génotype.

<i>Exemple n°1</i>	Plante témoin	Plante stressée
Image Visible		
Image IR		
T° moyenne de la plante (°C)	21.9/ pas de température ambiante mesurée	22.1/ pas de température ambiante mesurée

Nous n'avons pas d'indication de la valeur de la température ambiante au moment de la mesure, nous ne pouvons pas conclure sur le faible écart de température de surface des 2 plantes.

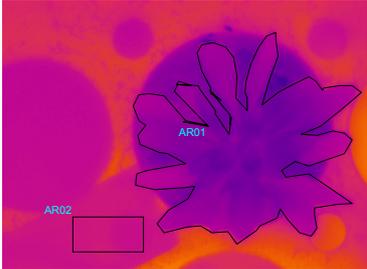
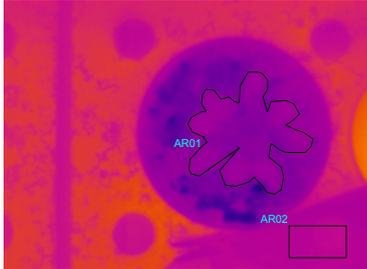
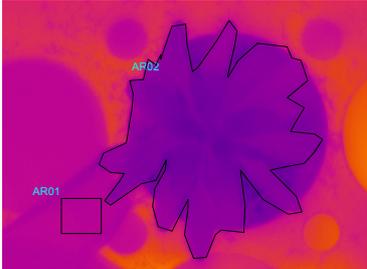
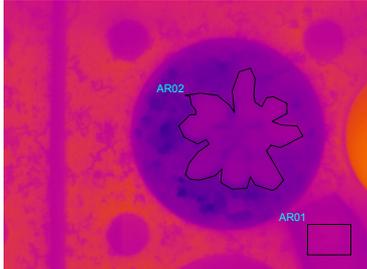
<i>Exemple n° 2</i>		
Image visible		
2-1 Image IR		
T°C SurfPlte/Amb	19.1/22	19.2/20.9
2-2 Image IR		
T°C SurfPlte/Amb	20.2/22.1	20.6/22.1

Tableau 6 : Comparaison de températures de surface de plantes témoins et stressées (exemples 1 et 2)

- dans l'exemple n°2-1, la différence de température est faible, voire nulle, entre plante stressée et non stressée par un déficit hydrique. Dans cet exemple, la température ambiante n'est pas identique sur les 2 images : l'interprétation est donc hasardeuse. D'autres facteurs peuvent entrer en compte : l'influence du sol ou l'architecture de la plante.

- Dans l'exemple 2-2, la température ambiante est identique. La différence entre plante stressée et témoin est de 0,4°C. Cette différence de température pourrait être indicatrice d'un stress. Une mesure de conductance stomatique indique en parallèle un écart de 35 % et confirme le stress.

Ces exemples n'ont pas la prétention de vouloir montrer la détection et la quantification d'un stress hydrique sur une plante entière à l'aide d'une caméra infrarouge, même si cela est possible ; il faudrait pour cela multiplier les répétitions, diminuer les effets d'ombrage de la caméra elle-même sur la plante. Ils montrent la difficulté d'utiliser la température de surface pour détecter le stress hydrique en chambre climatique. Le niveau de rayonnement PAR = 170 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ correspondrait à une mesure de PAR à l'extérieur quand le rayonnement global est d'environ 100 W/m². Par une belle journée le rayonnement global atteint 800W/m². Le bilan radiatif R_n au niveau de la feuille peut atteindre 500W/m² en milieu de journée. Cette énergie, la feuille devra la dépenser sous forme de flux de chaleur latente, LE, et de flux de chaleur sensible, H. La feuille en confort hydrique va transpirer et consommer ce trop plein d'énergie. La feuille stressée transpire peu, sa température augmente favorisant ainsi l'échange d'énergie avec l'air environnant. L'énergie qui n'a pas pu être dépensée en flux de chaleur latente, le sera en flux de chaleur sensible. La stratégie en extérieur est de faire des mesures de température au moment propice, quand le rayonnement est le plus fort. Si le vent est faible et le VPD fort alors les écarts de température entre plantes stressées et celles qui ne le sont pas seront grands. Dans la chambre climatique le rayonnement est faible et le brassage d'air est souvent fort. Il faudra s'attendre à de faibles écarts de températures entre plantes car il y a peu d'énergie à dépenser et cela même si le stress hydrique existe d'où la nécessité de mesures soignées et d'une maîtrise maximale des conditions environnementales de la plante au moment de la mesure.

L'objectif ici est surtout de montrer qu'il faut toujours rester prudent sur l'interprétation, et bien intégrer tous les facteurs d'erreurs et d'incertitudes liés au paramétrage de la caméra et aux conditions ambiantes de mesure.

Nous cherchons à améliorer la méthode pour mettre en évidence plus simplement des plus grandes différences de températures de surface (jusqu'à 3°C) entre plantes. Par exemple, des mesures de nuit (cas de certains géotypes gardant leurs stomates ouverts) ou au contraire, un plus fort rayonnement ou bien une isolation du sol peuvent améliorer et diminuer considérablement l'influence du milieu. On peut également prendre sur une même image les plantes témoins et stressées. Cela supposera alors d'éloigner la caméra ou de choisir un objectif adapté.

3.7 Quelques astuces pour les mesures

La mesure

La mesure peut s'effectuer de 2 façons :

- soit, tous les paramètres sont connus lors de la prise d'image avec précision (température ambiante, humidité relative, température réfléchie, émissivité...), et la mesure de température IR ou l'image IR est alors tout de suite exploitable ;
- soit tous les paramètres ne sont pas connus lors de la prise d'image et il est capital d'avoir les références pour la température ambiante et réfléchie sur la même image. On pourra alors

corriger les paramètres grâce au logiciel directement via la caméra ou via un PC de bureau et rectifier l'image.

Dans les 2 cas, il est important de toujours avoir présents sur une image une référence pour définir la température d'ambiance (§ ci-après) ainsi qu'un papier alu froissé/défroissé (§ 3.2), pour déterminer sur chaque image la température réfléchie.

- **la mesure de la température ambiante** que l'on peut définir en déposant à côté de l'objet à mesurer et sur le même plan, un papier à cigarette.

- **la mesure de la transmission** : il est simple de mesurer la transmission d'un film plastique par exemple. Il suffit de prendre la température d'un objet sans film et avec film, bien sûr exactement dans les mêmes conditions. Ensuite, il suffira d'ajuster la valeur du paramètre « transmission » jusqu'à trouver les mêmes valeurs de température dans les deux conditions.

☞ Les films transparents type cellofrais peuvent avoir des valeurs de transmission différentes d'un film à l'autre (0,7 à 0,95 : valeurs testées sur des films du commerce).

Pour des cibles dont la température est proche de la température ambiante, la transmission des fenêtres de température très voisine (cellofrais par exemple) devient difficile à compenser à cause des conditions limites.

Condition limite pour la transmission en prenant l'hypothèse d'un corps noir :

Pour un corps noir l'équation radiométrique simplifiée se réduit à :

$L_{\text{mesurée}} = L_{\text{objet}} * T + (1 - T) L_{\text{film}}$ et

$L_{\text{objet}} = L_{\text{film}}$ ($L = \text{Luminance}$)

Dans cette situation, la transmission ne joue plus et il faut considérer l'équation complète qui inclura la réflexion du film, les températures réfléchies, ce qui complique la mesure.

Conclusion

La thermographie infrarouge apparaît ici comme une technique intéressante puisqu'elle est sans contact, non destructive, précise et qu'elle peut être intégrative. Sa maîtrise reste délicate et l'interprétation des résultats dépend souvent de l'environnement proche.

Une fois la technique maîtrisée, il reste à exploiter les images. Une automatisation du traitement des images est en cours au LEPSE, par établissement de masques à partir d'images visibles pour établir le contour de chaque plante et pour ainsi définir leur température moyenne. Le logiciel ImageJ sera largement utilisé.

Le haut débit IR n'est donc pas encore pour aujourd'hui, mais le projet existe. Si d'autres unités sont intéressées ou ont déjà avancé sur ce sujet, une coopération pourrait s'engager.

Remerciement

Nous remercions M. Demoyer (ITC France) pour ses conseils concernant l'utilisation de la caméra infrarouge, la prise d'images, et pour la relecture de cet article. Merci à Marjorie Pervent pour le prêt de ses plantes.

Bibliographie

- Albrecht B. and Cox S.K. (1977) Procedures for improving pyrgeometer performance, *Journal of Applied Meteorology*, 16, 188-197.
- Idso S.B. (1981) A set of equations for full spectrum and 8- to 14- μm thermal radiation from cloudless skies, *Water Resources*, 17(2), 295-304.
- Jones H.G. (1999) Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surface. *Plant cell and environment* 22, 1043-1055
- Jones H.G., Stoll M., Santos T., de Sousa C., Chaves M.M. and Grant O.M (2002) Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 53, No. 378, pp. 2249-2260, November 2002
- Jones H.G., Archer N., Rotenberg E. and Casal R. (2003) Radiation measurement for plant ecophysiology, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 54, No. 384, pp. 879-889,
- Katerji, (1988) *Agronomie* 1988, 8(5), 425-433.
- Morel J.-Ph et Oliviéri J. (2007) La mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge, https://intranet.inra.fr/mission_qualite/acces_thematiques/formations_et_ecoles
- Oliosio A. (1995) Estimating the difference between brightness and surface temperatures for a vegetal canopy, *Agriculture and Forest Meteorology*, 72, 237-242.
- Tuzet A. (2008) Notions théoriques des transferts radiatifs *In* Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge, *Le Cahier des Techniques de l'Inra*, pp.7-34.
- NORME ASTM E 1933 REV A 2005-MAR-01 • Active/Current • Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.

Annexe 1

Tableau d'émissivité (non métaux)

☞ Les émissivités dépendent de la longueur d'onde à laquelle on effectue la mesure

Matériel	Émission			
	1,0 µm	5,0 µm	7,9 µm	8-14 µm
Glace	n. d.	—	0,98	0,98
Terre	n. d.	0,9-0,98	0,9-0,98	
Couleur (pas alcalin)	—	0,9-0,95	0,9-0,95	
plâtre	n. d.	0,4-0,97	0,8-0,95	0,8-0,95
	Verre			
Vitre	n. d.	0,98	0,85	0,85
Coulé	n. d.	0,9	n. d.	n. d.
Caoutchouc	n. d.	0,9	0,95	0,95
Bois (naturel)	n. d.	0,9-0,95	0,9-0,95	0,9-0,95
Calcaire	n. d.	0,4-0,98	0,98	0,98
Karborund	n. d.	0,9	0,9	0,9
Céramique	0,4	0,85-0,95	0,95	0,95
Gravier	n. d.	0,95	0,95	0,95
Carbone				
non oxydé	0,8-0,95	0,8-0,9	0,8-0,9	0,8-0,9
Graphite	0,8-0,9	0,7-0,9	0,7-0,8	0,7-0,8
Papier (chaque couleur)	n. d.	0,95	0,95	0,95
Matière (tissu)	n. d.	0,95	0,95	0,95
Sable	n. d.	0,9	0,9	0,9
Neige	n. d.	—	0,9	0,9
Argile	n. d.	0,85-0,95	0,95	0,95
Eau	n. d.	—	0,93	0,93

n. d. = non disponible

Quelques références pour les couverts végétaux :

type de surface	émissivité
prairie	0,98
blé	0,97
maïs	0,96
vignes, vergers	0,95
résineux	0,98
feuillus	0,97

Adapté de Girard et Girard (1999)