

Comparaison d'un calcul CFD avec des tests expérimentaux afin de déterminer un modèle prédictif de globe noir en fonction de la charge solaire

Comparison of CFD calculations with experimental tests to determine a predictive black globe model as a function of solar load

Laurence ROBERT¹, François-Xavier KELLER^{1*}

¹Institut National de Recherche et de Sécurité, avenue du Morvan – 54519 Vandœuvre-lès-Nancy

* (auteur correspondant : keller@inrs.fr)

Résumé - Le changement climatique, accompagné de périodes de fortes chaleurs, modifie significativement les environnements de travail thermiques des salariés, notamment ceux travaillant en extérieur. Pour appliquer la démarche d'évaluation du risque par la méthode ATP (Astreinte Thermique Prévisible), la prise en compte du rayonnement solaire est déterminante. Dans le cas spécifique du travail en extérieur, la recherche d'une corrélation entre le flux solaire et la température du globe noir par simulation numérique est initiée dans ce travail. Une première comparaison à des mesures expérimentales est proposée et devra être complétée.

Abstract - Climate change, accompanied by periods of intense heat, significantly alters the thermal working environments of employees, particularly those working outdoors. To apply the risk assessment approach using the PHS (Predicted heat Strain) method, it is essential to take solar radiation into account. In the specific case of outdoor work, this study seeks to establish a correlation between solar flux and black globe temperature using numerical simulation. An initial comparison with experimental measurements is proposed and will need to be completed.

Nomenclature

λ	Conductivité thermique, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	d_g	Diamètre du globe noir, m
ρ	Masse volumique, kg.m^{-3}	E_{res}	Flux échangé par la respiration (chaleur latente), W.m^{-2}
α	Diffusivité thermique, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	E_v	Flux échangé lors de l'évaporation de la sueur, W.m^{-2}
α_{sps}	Albédo du globe pour les courtes longueurs d'onde solaire	f_{cl}	Facteur de surface de vêtement
α_{spl}	Albédo du globe pour les longues longueurs d'onde solaire	f_{dr}	Proportion de flux solaire direct
α_{sol}	Albédo du sol	f_{dif}	Proportion de flux solaire diffus
ε_a	Emissivité de l'air	H	Hauteur, m
ε_g	Emissivité du globe noir	h_r	Coefficient d'échange par rayonnement, $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
ε_{sol}	Emissivité du sol	K	Flux échangé par conduction, W.m^{-2}
σ	Constante de Boltzmann, $\text{W}.\text{(m}^2.\text{K}^4)^{-1}$	l	Largeur, m
C	Flux convectif, W.m^{-2}	L	Longueur, m
C_{res}	Flux échangé par la respiration (chaleur sensible), W.m^{-2}	M	Métabolisme énergétique, W.m^{-2}

Pr	Pression relative, Pa	T_g	Température de globe noir, °C
R	Flux radiatif, W.m ⁻²	$T_{g,EXP}$	Température de globe noir expérimentale, °C
RS	Flux solaire total, W.m ⁻²	$T_{g,CFD}$	Température de globe noir numérique, °C
S	Stockage de chaleur du corps, W.m ⁻²	T_r	Température moyenne de rayonnement, °C
S_{SP}	Facteur de forme soleil/globe noir	T_{sk}	Température de la peau, °C
S_g	Surface du globe noir, m ²	V_a	Vitesse de l'air, m.s ⁻¹
T_a	Température de l'air, °C	W	Puissance mécanique utile, W.m ⁻²

Acronymes

<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>ATP</i>	Astreinte Thermique Prévisible

1. Introduction

Les changements climatiques s'accompagnant de périodes de fortes chaleurs de plus en plus fréquentes, intenses et longues posent la question de l'évaluation des risques professionnels des salariés exerçant en extérieur. Qu'ils s'agissent de travailleurs du BTP, d'entretien d'espaces verts ou de voiries, les salariés de centres aérés, de centres de loisir ou de piscine, les préposés au courrier, ... le nombre de salariés exposés aux conditions climatiques estivales est important. La prise en compte du risque professionnel de ces salariés nécessite une évaluation du poste de travail la plus représentative de la situation de travail. Dans cet objectif, la démarche d'Astreinte Thermique Prévisible (ATP) proposée par la norme NF EN ISO 7933 [1] et expliquée dans l'outil INRS [2,3] est ciblée dans ce travail. Néanmoins, deux verrous sont à lever : la prise en compte de données évoluant au cours du temps et l'accès facilité à la température de rayonnement. Le présent travail porte sur ce second aspect uniquement.

1.1. La démarche ATP : bilan thermique d'un individu dans un environnement donné

En situation de contrainte chaude la démarche la plus pertinente pour évaluer la situation d'un salarié est la démarche ATP. Basée sur le bilan thermique d'une personne placée dans une ambiance thermique spécifiée, cette démarche permet de prédire le débit sudoral et la température corporelle centrale que l'organisme humain met en œuvre en réaction aux conditions de travail à la chaleur. La stabilité de la température corporelle chez l'être humain implique un équilibre entre production de chaleur endogène et pertes ou gains de chaleur avec l'environnement : c'est le bilan thermique. Il se traduit par l'équation (1) suivante :

$$M + W + K + R + C + E_v + E_{res} + C_{res} = S \quad (1)$$

Cette équation exprime que la production de chaleur interne du corps, qui correspond au métabolisme énergétique moins la puissance mécanique utile doit être compensée par les échanges de chaleur, au niveau des voies respiratoires, ainsi que par les différents échanges de chaleur, au niveau de la peau, par conduction, convection, rayonnement et évaporation de la sueur. Ces différents flux peuvent être positifs ou négatifs. Par convention, tout flux de chaleur reçu par le corps est positif et tout flux perdu est négatif. Le solde éventuel, appelé stockage de chaleur, s'accumule dans le corps. La situation recherchée est celle de l'équilibre thermique, c'est-à-dire un terme "S" nul pour qu'il n'y ait ni perte ni accumulation de chaleur.

Dans ce bilan thermique, les flux thermiques échangés par rayonnement sont prépondérants dès lors qu'il y a une source de chaleur rayonnante : fours, procédés chauds, coulées en fusion,

soleil par exemple. Les plages de températures restreintes dans lesquelles les échanges par rayonnement ont lieu entre l'homme et son environnement, permettent de linéariser le flux thermique radiatif R par l'expression (2) suivante :

$$R = h_r \times f_{cl} \times (T_{sk} - T_r) \quad (2)$$

Avec h_r le coefficient d'échange par rayonnement, f_{cl} le facteur prenant en compte la réduction des échanges grâce aux vêtements, T_{sk} la température de la peau et T_r la température moyenne de rayonnement.

1.2. La température de globe noir

La température moyenne de rayonnement est la résultante des échanges thermiques par rayonnement entre le corps et l'ensemble de son environnement. Pour la mesurer, on utilise un globe noir, communément appelée "boule noire". Il s'agit d'un capteur de température placé dans un globe métallique peint en noir mat d'un diamètre standard de 15 cm. Dans l'environnement dans lequel est effectuée la mesure, qu'il soit intérieur ou extérieur, le globe noir tend vers un équilibre thermique sous l'effet des échanges radiatifs avec les sources environnantes et des échanges convectifs avec l'air ambiant. A partir du bilan thermique de ce globe noir standard, dans un régime de convection forcée, la température moyenne de rayonnement s'exprime par l'équation (3) ; elle est fonction de la température de globe, de la température de l'air et de sa vitesse. La démarche est détaillée dans la norme NF EN ISO 7933 [4].

$$T_r = [(T_a + 273,15)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \times (V_a^{0,6}) \times (T_g - T_a)]^{0,25} - 273,15 \quad (3)$$

La température de globe noir est une mesure qui requiert quelques précautions, car une incertitude sur la température de rayonnement peut entraîner une erreur importante dans l'estimation de la contrainte. En outre, cette mesure n'est pas toujours disponible pour les services de santé voulant évaluer une situation professionnelle d'exposition.

En revanche, aujourd'hui un ensemble de données météorologiques sont disponibles et notamment, la possibilité d'avoir accès au flux solaire direct. Plusieurs auteurs [5-7] proposent des expressions empiriques de la température de globe noir en fonction notamment du rayonnement solaire direct reçu, mais aussi de la température, de la vitesse ou de l'humidité relative de l'air. Cependant ces expressions empiriques restent valables dans des environnements restreints : désert, sol végétalisé ou à des latitudes spécifiques, ne pouvant pas être utilisées pour la France. C'est pourquoi l'objectif principal de ce travail est de rechercher une corrélation reliant la température de globe noir au flux solaire pour :

- Proposer une alternative à la métrologie du globe noir,
- Etudier quels sont les facteurs les plus impactants,
- Pouvoir simplifier l'utilisation du modèle ATP.

Pour répondre à ces objectifs, notre choix s'est tourné vers la simulation numérique.

2. Construction du modèle

2.1. Compréhension de phénomènes physiques [8]

Le bilan thermique du globe noir dans un environnement extérieur peut être exprimé comme suit :

$$(1 - \alpha_{sps}).RS.(f_{dr}.S_{sp} + (1 - \alpha_{sol}).f_{dif}) + (1 - \alpha_{spl}).\sigma.\varepsilon_a.T_a^4 = \varepsilon_g.\sigma.T_g^4 + h_c.S_g.(T_g - T_a) \quad (4)$$

Cette expression comprend quatre termes principaux. Le premier terme reflète la contribution du flux solaire sur le globe noir avec, une part de flux direct reçu par le globe pondérée par le facteur de forme entre le soleil et le globe noir, et une part de flux diffus. Le second terme traduit le rayonnement de l'atmosphère reçu par le globe à la température et émissivité de l'air exprimé par la loi de Stefan-Boltzmann. Le globe émet également un rayonnement traduit lui aussi par la loi de Stefan-Boltzmann et exprimé dans le troisième terme de cette équation bilan. Enfin, le dernier terme traduit les échanges convectifs entre le globe et l'environnement dans lequel il est plongé.

La connaissance du bilan thermique du globe noir soumis au rayonnement solaire tel qu'explicité ci-avant va nous permettre de choisir les paramètres du modèle de simulation numérique ainsi que les conditions limites les plus adaptées à la situation réelle d'exposition.

2.2. Description du modèle CFD

Un modèle de calcul a été mis en œuvre afin de simuler l'écoulement d'air et les échanges thermiques autour et dans un globe noir de 15 cm de diamètre et de 1mm d'épaisseur de paroi, placé à 1.6 m du sol dans un environnement libre. Les dimensions globales du volume considéré sont : 1.2 m x 3.0 m x 2.0 m, avec la position du centre du globe noir en 0.0 m x 1.0 m x 1.6 m (figure 1a).

Un modèle 3D stationnaire turbulent a été mis en place pour réaliser les simulations. La masse volumique ρ de l'air est considérée comme constante. Un modèle RANS k- ε est utilisé pour tous les calculs effectués. Le logiciel de simulation numérique employé est StarCCM+.

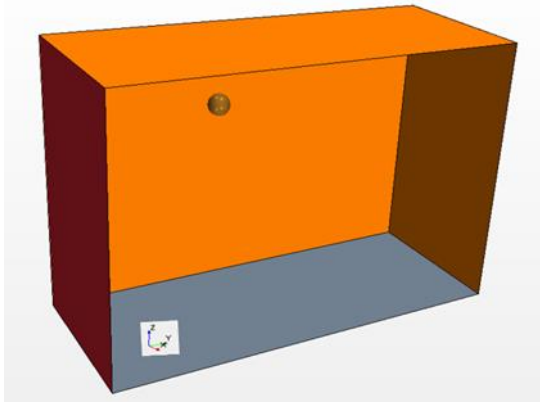


Figure 1a : Géométrie avec position du globe noir

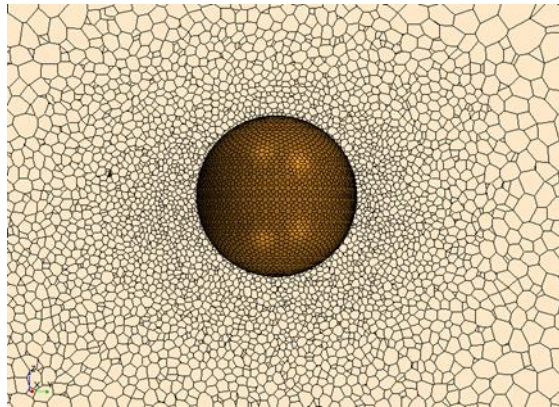


Figure 1b : Détail du maillage autour du globe noir

2.2.1. Les conditions aux limites et les conditions initiales

La vitesse d'air en entrée est imposée et fixée pour chaque calcul. La température de l'air est également fixée sur chacune des faces du modèle ainsi que la pression relative imposée à 0 Pa (entrée, haut, gauche, droite, sortie). En revanche, pour le sol, la température est calculée en fonction du flux solaire, de l'émissivité et de la réflectivité du sol. Plusieurs conditions de sol ont été simulées (asphalte rouge, dalle calcaire, pelouse sèche, asphalte noir). L'émissivité de

la surface du globe noir est fixée à 0.95. Les différentes conditions des calculs proviennent d'essais expérimentaux synthétisées dans le tableau 1.

2.2.2. Simulation numérique et maillage utilisé

Un maillage est réalisé avec une taille de maille de 4mm sur la paroi du globe noir, le nombre de mailles est de l'ordre de 250.000 cellules dans le volume étudié. Une coupe du maillage autour du globe noir est présentée figure 1b. La simulation numérique permet de calculer la température au centre du globe noir. La visualisation d'un exemple de champs de température et de vitesses inhérents à l'écoulement de l'air autour du globe noir est présentée figure 2a et 2b.

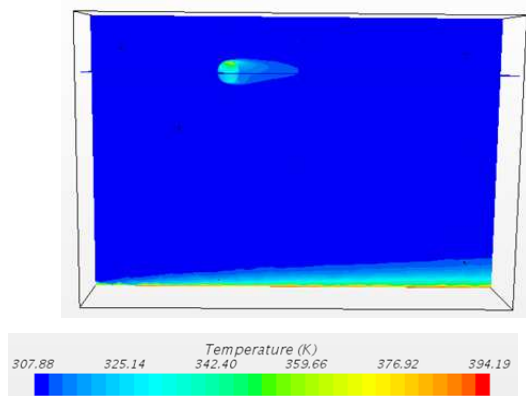


Figure 2a : Visualisation d'un champ de températures autour du globe noir

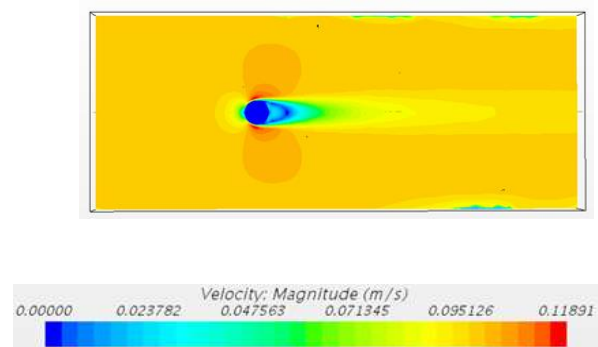


Figure 2b : Visualisation d'un champ de vitesses autour du globe noir

2.2.3. Modèle de charge solaire

Le logiciel StarCCM+ propose un modèle de charge solaire pour lequel seront renseignées les flux solaires direct et diffus. Le modèle de BIRD [9] a été utilisé pour obtenir la part de charge solaire diffuse par rapport à la charge solaire totale mesurée par pyranomètre. L'hypothèse de considérer un pourcentage constant de 80/20 entre flux direct et flux diffus a été retenue. Les coordonnées de géo-positionnement par satellite du lieu ainsi que la date et l'heure sont utilisées pour calculer l'azimut et l'altitude solaire nécessaires au modèle de charge solaire.

3. Cas de validation

3.1. Protocole expérimental

Au cours de l'été 2025, lors de journées particulièrement chaudes et ensoleillées, un ensemble de mesures (figures 3 a-b) permettant de décrire l'environnement thermique du globe noir ont été conduites, comme décrites ci-après :

Les enregistrements de la température et de l'humidité de l'air ont été réalisés par un enregistreur ARANET 4 du fabricant TH Instrument avec un transfert des données toutes les minutes au cours de la journée. La mesure de la température d'air est donnée avec une précision de ± 0.3 °C sur la gamme 0-50 °C. La mesure d'humidité est donnée avec une précision de $\pm 3\%$ sur la gamme 0-85 %. L'ARANET 4 est toujours placé à l'ombre, protégé du rayonnement direct du soleil.

La température de globe est mesurée à l'aide d'un globe noir mat de diamètre 15 cm connecté à une unité centrale TESTO 480. La mesure au globe noir comprend un thermocouple de type K de précision ± 0.5 °C se situant à l'intérieur d'une sphère en cuivre creuse et peinte en noir mat à l'extérieur lui assurant une émissivité de 0,95. La mesure de la vitesse de l'air est réalisée avec une boule chaude omnidirectionnelle de précision ± 0.05 m/s également connectée au TESTO 480.

Un montage avec deux pyranomètres CM 6B de KIPP & ZONEN de précision ± 15 W/m², montés en sens opposé sur un support idoine permet d'obtenir le flux solaire total et de quantifier l'albedo de l'environnement de mesures, soit le flux réfléchi par l'environnement dans lequel a été placé le globe noir. En effet, les mesures ont été conduites dans plusieurs types d'environnements extérieurs : pelouse proche ou pas de bâtiments, asphalte rouge proche de bâtiments tertiaires et asphalte noir ainsi que dallage calcaire proche d'habitations résidentielles. Pour ces environnements l'albédo moyen était compris entre 0.11 et 0.40.



Figure 3a : Exemple du montage expérimental disposé sur une pelouse



Figure 3b : Détail de la mise en œuvre des deux pyranomètres

3.2. Cas expérimentaux retenus

10 cas de mesures expérimentales ont été retenus pour confronter le modèle numérique. Les cas retenus sont présentés dans le tableau 1. Chaque cas correspond à une heure précise de la journée de mesure, sélectionnée en raison de conditions atmosphériques relativement constantes, excluant tout passage de nuage, ou toute fluctuation importante de vitesse d'air. Les grandeurs nécessaires à la comparaison (RS , V_a , T_a , *albédo* et T_g) sont obtenues à partir de leur moyenne sur 30 minutes autour de l'heure annoncée. Les essais ont été pour la plupart menés dans la périphérie de Nancy (54) sauf le cas 5 qui a été mené dans le Loir et Cher (41). L'émissivité du sol est déduite de la mesure de l'albédo comme son complément à 1.

	<i>Date</i>	<i>Heure</i>	RS $W.m^{-2}$	<i>Type</i> <i>d'environnement</i>	<i>Albédo</i> <i>du sol</i>	V_a $m.s^{-1}$	T_a °C	$T_{g,EXP}$ °C
Cas 1	24/06/25	15h00	834	Asphalte rouge	0.11	3.0	29.2	37.5
Cas 2	25/06/25	14h00	867	Dallage clair	0.40	2.0	37.5	49.1
Cas 3	25/06/25	11h00	712	Dallage clair	0.40	2.6	29.3	44
Cas 4	25/06/25	17h00	590	Dallage clair	0.40	2.6	39.4	48
Cas 5	18/06/25	14h00	896	Pelouse/bâtiment	0.15	2.6	32.5	41.5
Cas 6	10/07/25	14h00	902	Asphalte rouge	0.11	2.6	22.7	36.7
Cas 7	02/07/25	12h15	852	Pelouse	0.22	1.1	37.2	47.9
Cas 8	02/07/25	15h00	888	Pelouse	0.22	1.1	39.8	52.3

Cas 9	17/07/25	15h10	682	Asphalte rouge	0.11	0.9	24	31.5
Cas 10	31/07/25	12h35	783	Asphalte noir	0.23	0.54	28.3	39.3

Tableau 1 : *Recueil des mesures expérimentales*

Les cas expérimentaux retenus conduisent à des températures de globe noir comprises entre 31.5 et 52.3°C.

3.3. Cas de simulation

Les grandeurs mesurées dans chacun des 10 cas du tableau 1 ont été implémentées dans le modèle numérique de façon à obtenir une température de globe modélisée ($T_{g,CFD}$) directement comparée à la valeur expérimentale ($T_{g,EXP}$) au tableau 2.

	$T_{g,EXP}$ °C	$T_{g,CFD}$ °C	$ T_{g,EXP} - T_{g,CFD} $ °C	Ecart %	
Cas 1	37.5	42.4	4.9	13.1	Surestimation du modèle
Cas 2	49.1	54.8	5.7	11.6	Surestimation du modèle
Cas 3	44	41.6	2.4	5.5	Sous-estimation du modèle
Cas 4	48	48.5	0.4	0.8	Surestimation du modèle
Cas 5	41.5	47	5.5	13.2	Surestimation du modèle
Cas 6	36.7	37.4	0.7	1.9	Surestimation du modèle
Cas 7	47.9	49.4	1.5	3.1	Surestimation du modèle
Cas 8	52.3	52.2	0.2	0.4	Sous-estimation du modèle
Cas 9	31.5	38	6.5	20.6	Surestimation du modèle
Cas 10	39.3	45.2	5.9	15	Surestimation du modèle

Tableau 2 : *Comparaison des températures de globe expérimentales et simulées, écart absolu et écart en % par rapport à la température expérimentale.*

Sur la gamme des température expérimentales le modèle numérique proposé fournit des températures simulées avec des écarts absolus compris en 0.4 et 6.5°C. Il n'existe pas de tendance systématique, cependant le modèle semble plus souvent surestimer la température de globe. La figure 4 propose une comparaison graphique des températures de globes expérimentales versus simulées.

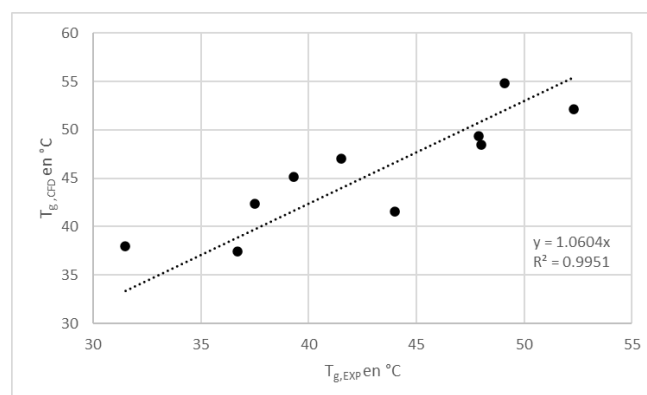


Figure 4 : *Comparaison des températures de globe noir expérimentale et modélisée.*

Bien qu'encourageants ces premiers résultats nécessitent d'être approfondis pour réduire l'écart entre le calcul et l'expérimental. La première piste envisagée est d'enrichir ce travail par

la simulation de cas expérimentaux supplémentaires afin de réaliser une étude comparative plus pertinente. Un nombre plus important de comparaisons permettra de valider le modèle numérique, de lui associer une précision de prédiction mais aussi d'étudier l'influence des paramètres clés : charge solaire, caractéristiques de l'air et caractéristiques de l'environnement. Ces travaux sont programmés dès la période estivale 2026 où un plus grand nombre de données expérimentales pourront être recueillies. Une seconde piste est d'améliorer la robustesse du protocole expérimental et d'étudier l'impact des écarts d'une grandeur mesurée (température et/ ou vitesse de l'air, charge solaire directe ou albédo) sur la résultante issue du modèle. Des premiers calculs ont été conduits sur l'impact d'un écart de température d'air sur la température de globe annoncée par le modèle numérique ; ils doivent être enrichis. Enfin, certains choix d'hypothèses pourront être confortés, comme celle, issue du modèle de BIRD, relative à la part de flux solaire direct et diffus.

4. Conclusion

Ce travail relatif au bilan thermique d'un globe noir soumis à un rayonnement solaire a été initié pour proposer un modèle numérique susceptible de simuler la température de globe dans le cadre de l'évaluation de la contrainte thermique d'un salarié travaillant en extérieur en période de forte chaleur.

Le modèle développé et les mesures expérimentales permettant de le valider, seront enrichis au cours de la période estivale 2026. Une fois affiné, ce modèle permettra une alternative à la métrologie par le globe noir, peu déployée en entreprise et dans les services de santé au travail, pour intégrer un modèle simplifié d'évaluation de la contrainte thermique.

Références

- [1] AFNOR - NF EN ISO 7933 : 2023. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible.
- [2] Editions INRS. Brochure 6532 : Guide d'évaluation des risques liés aux ambiances thermiques. Novembre 2024, ISBN 978-2-7389-2907-5.
- [3] Editions INRS. Outil 152: Ambiances thermiques: outil d'évaluation de la contrainte ou de l'inconfort lié aux ambiances thermiques, <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil152>.
- [4] AFNOR - NF EN ISO 7726 : 2002. Ergonomie des ambiances thermiques : Appareils de mesure des grandeurs physiques.
- [5] HAJIZADEH R, and al. Offering a model for estimating black globe temperature according to meteorological measurements. Meteorological applications, 24 :303-307 (2017). <https://doi.org/10.1002/met.1631>
- [6] CARTER A W, and al. Method for estimating Wet Bulb Temperature from remote and low-cost data : a comparative study in central Alabama. GeoHealth, 4 (2020). <https://doi.org/10.1029/2019GH000231>
- [7] FREIRE da SILVA T G and al. Black globe temperature from meteorological data and bioclimatic analysis of brazilian northeast for saanen goats. Journal of Thermal Biology, 85 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102408>
- [8] HUNTER C, and al. Estimating wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements. U.S. Department of Energy, Office of scientific and technical Information, WSRC-MS-99-00757, 2-7.
- [9] BIRD R E, and al. Simple Solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. Journal of Climate and Applied Meteorology. <https://www.jstor.org/stable/26182461>