

**Modalités et limites
d'utilisation d'un appareil
de mesure rapide
dans l'analyse
de la contrainte thermique**



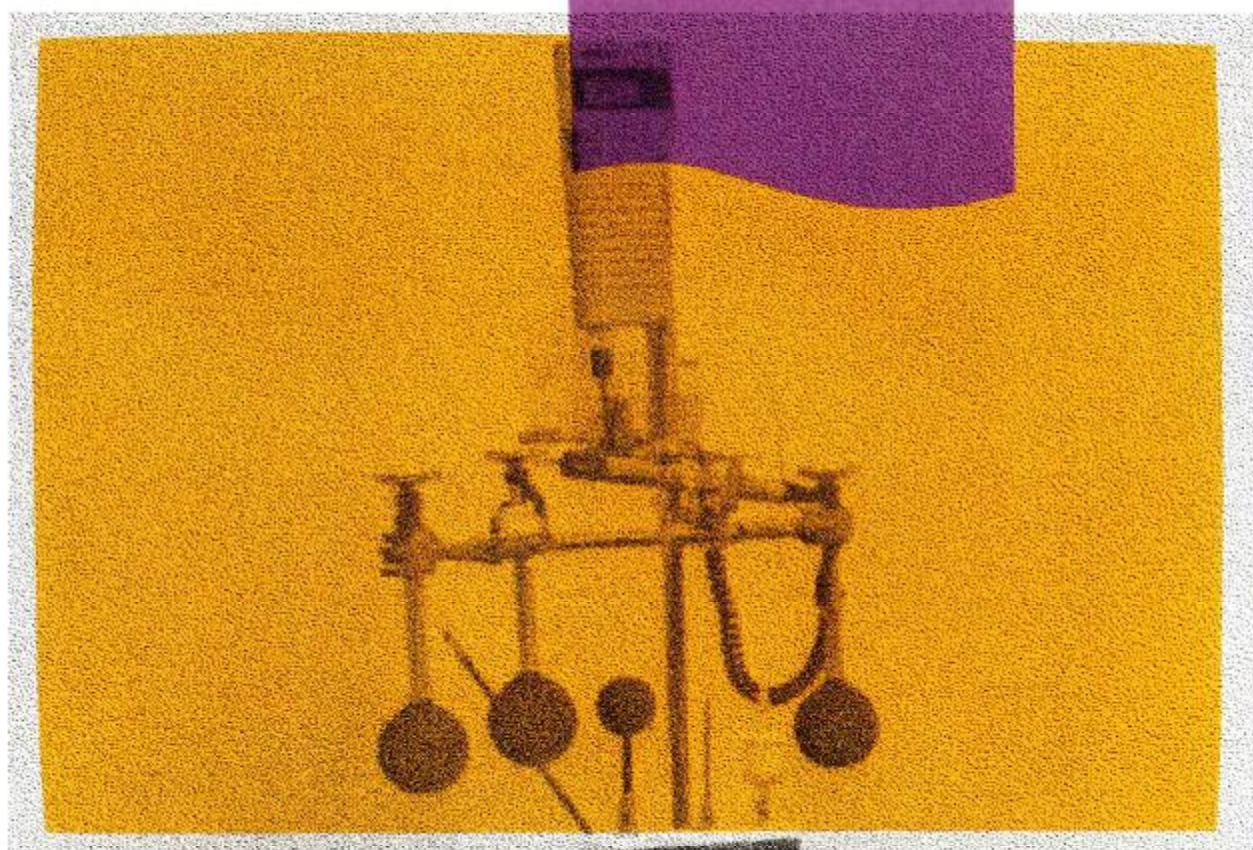
**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Pierre C. Dessureault
Jamal Lyagoubi
André Couture

Octobre 1997

R-171

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et subventionne des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut, en téléphonant au 1-877-221-7046.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications ou gratuitement sur le site de l'Institut.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
1997

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail
Octobre 1997.

**Modalités et limites
d'utilisation d'un appareil
de mesure rapide
dans l'analyse
de la contrainte thermique**

Pierre C. Dessureault, Jamal Lyagoubi, André Couture
Université du Québec à Trois-Rivières

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	i
Introduction	1
La contrainte thermique	1
Indices thermiques	2
Le Botsball	3
Revue de littérature	5
Objectifs de l'étude	10
Méthodologie	11
Instrumentation	12
Protocole	13
Résultats	15
Analyse des données	17
Analyse pour chaque condition climatique	17
Analyse de la contribution marginale des paramètres de base	18
Contribution de variables indépendantes	20
Discussion	24
Conclusion	26
Références	27
Annexe1 Dispositif de contrôle de la vitesse de l'air, de l'humidité et du rayonnement	
Annexe2 Recommandations aux utilisateurs	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	Relations WBGT-Botsball.....	6
Tableau II	Conditions environnementales étudiées	16
Tableau III	Ambiances climatiques dominantes	20
Tableau IV	Formules de conversion pour le Botsball modifié.....	22
Tableau V	Formules de conversion pour le Botsball standard	23

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Botsball.....	4
Figure 2.	Montage WBGT	6
Figure 3.	Montage instrumental.....	14

Sommaire

Ce document résume les résultats d'une recherche visant à déterminer le potentiel, les modalités et limites d'utilisation d'un appareil de mesure rapide des ambiances de travail chaudes. L'appareil retenu pour étude est le Botsball, proposé par J.H. Botsford en 1971. Deux versions, soit l'instrument standard et la version modifiée, sont analysées. Ces instruments ont été sporadiquement utilisés en remplacement des appareils de lecture de la température WBGT dans le passé, et sont encore populaires auprès des services militaires américains. L'étude a permis d'expérimenter les Botsballs en chambre climatique sous 29 ambiances thermiques pour un total de 849 observations. Des lectures prises à l'extérieur durant des journées chaudes de l'été 96 ainsi que dans des milieux industriels variés complètent les données.

L'analyse de l'influence de chacun des paramètres environnementaux régissant l'ambiance thermique, à savoir, la température de l'air, l'humidité, la vitesse de l'air et le rayonnement, sur le comportement des Botsballs a conduit à distinguer six conditions climatiques dominantes et par conséquent, à proposer six modèles mathématiques de conversion Botsball à WBGT. Ces six conditions sont caractérisées par trois modalités en ce qui concerne le taux d'humidité (faible, modéré ou fort) et deux modalités pour les radiations (présence ou absence). La vitesse de l'air a été négligée vu sa faible contribution à la variation du comportement des Botsballs standard et modifié.

L'introduction de la température de l'air (T_a) dans l'équation de régression linéaire multiple améliore le coefficient de détermination R^2 et permet une meilleure approximation du WBGT. De plus, la température de l'air (T_a) se mesure très facilement en retirant le thermomètre du Botsball de son globe. Les valeurs des coefficients de détermination R^2 sont très élevées et la corrélation est linéaire et positive. L'instrument standard donne d'aussi bons résultats que sa version modifiée dans la majorité des conditions climatiques étudiées, en particulier dans les milieux les plus humides. Les résultats de cette étude montrent que le Botsball peut être utilisé dans des conditions climatiques très variables à l'intérieur comme à l'extérieur.

Les modèles obtenus par cette étude ont été appliqués sur les données prises dans divers milieux industriels. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et confirment les coefficients de corrélation et les erreur-types obtenus en laboratoire.

Le Botsball s'avère donc un appareil fiable et précis pour l'évaluation du WBGT dans le milieu du travail. Il est à la fois plus simple, moins cher, plus robuste et plus pratique que les instruments de lecture de la température WBGT.

Introduction

La contrainte thermique

L'ensemble des paramètres régissant le niveau de contrainte thermique comprend la tenue vestimentaire (isolation thermique et perméabilité), la production interne de chaleur métabolique et enfin l'environnement thermique. À son tour, l'environnement thermique est composé de quatre paramètres physiques distincts, à savoir, la température de l'air, la vitesse de l'air, l'humidité et la température moyenne de rayonnement.

La température de l'air influence les échanges de chaleur par convection entre l'homme et son environnement. Le taux d'échange par convection est directement proportionnel à la différentielle entre la température de l'air et celle de la peau.

La vitesse de l'air influence les niveaux d'échange de chaleur par convection (gain ou perte de chaleur) et par évaporation (perte de chaleur). Dans les deux cas, une vitesse de l'air plus élevée réduit l'épaisseur du film d'air faisant transition entre la peau et l'environnement pour ainsi augmenter le taux d'échange de chaleur.

L'humidité relative n'affecte que le taux d'évaporation. Parce que sous contrainte thermique élevée, ce dernier mode d'échange devient de loin le plus important, l'effet de l'humidité peut être très marqué. Le taux d'évaporation est directement proportionnel à la différence entre les pressions partielles de vapeur d'eau (mesure de l'humidité absolue) à la surface de la peau et dans l'air.

Finalement, le mode de transfert de chaleur par rayonnement est généralement d'importance modeste. Parce que tout corps au-dessus de zéro degré absolu ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) émet un rayonnement électromagnétique selon sa propre température et son émissivité, il est plus pratique de calculer le bilan des échanges entre l'homme et l'ensemble des sources l'entourant à partir de la température moyenne de rayonnement, elle même calculée à partir de la température du globe noir (de Vernon).

Indices thermiques

Une mesure complète du niveau de contrainte thermique environnementale doit donc tenir compte de l'influence relative de ces quatre paramètres à la fois. Ce concept est reconnu depuis longtemps. Déjà en 1927, Yaglou et ses collaborateurs proposaient l'indice de la *Température effective*. Cet indice a dès lors été utilisé mondialement. Il se définit comme la température d'un air saturé en vapeur d'eau, calme, qui produit la même sensation de confort ou d'inconfort que l'ambiance considérée. Sa valeur est lue sur un abaque à partir des valeurs de la température de l'air, la température humide et la vitesse de l'air. Cet indice ne considérait donc pas le rayonnement. Aussi plus tard, la *température effective corrigée pour le rayonnement* (TECR) a remédié à cette situation en introduisant la température globe à la place de la température de l'air.

La température effective dans sa version corrigée pour le rayonnement a été largement utilisée malgré quelques difficultés d'application dont la principale était la lecture de la vitesse de l'air. Ce paramètre est encore aujourd'hui très difficile de lecture et constitue une source d'erreur importante dans l'analyse rationnelle de la contrainte thermique. En milieu industriel aussi bien qu'à l'extérieur, la vitesse de l'air peut être très faible, s'approchant même de la limite de détection des instruments les plus sensibles. Son intensité et sa direction varient parfois constamment et simultanément. En 1957, le Département de la défense américaine mandatait deux des meilleurs chercheurs de l'époque, Yaglou et Minard, pour développer un indice de contrainte thermique qui donne une valeur analogue à celle de la température effective corrigée mais qui soit plus simple d'application, notamment en évitant la lecture de la vitesse de l'air.

Cette recherche a mené au développement de l'indice le plus utilisé dans le monde; le *Wet bulb and globe temperature* ou WBGT. Cet indice est donc un modèle mathématique permettant d'extraire la température effective corrigée à partir de trois températures: humide naturelle (WB), globe (GT) et de l'air (DB). Chacun des quatre paramètres de base régissant l'environnement thermique influence la lecture WBGT de différentes façons. Ainsi, la température humide naturelle est influencée à la fois par l'humidité, la vitesse et la température de l'air. De son côté, la température globe dépend de la température et de la vitesse

de l'air ainsi que du niveau de rayonnement. Ces lectures, couplées à la simple température de l'air, forment un modèle général:

$$WBGT = 0,7 WB + 0,3 ((GT-DB) K + DB)$$

Sous des conditions ensoleillées, la valeur de "K" dépend de la couleur des vêtements (travailleur couvert) ou de celle de la peau (travailleur semi-nu). Pour les fins de simplification, la valeur de 0,67 a été retenue, correspondant à la couleur kaki de l'uniforme de l'armée américaine. Sous ces conditions, le calcul du WBGT devient:

$$WBGT = 0,7 WB + 0,2 GT + 0,1 DB$$

À l'ombre, la nuit ou à l'intérieur, K égale 1, réduisant l'équation à:

$$WBGT = 0,7 WB + 0,3 GT$$

Le Botsball

En 1971, J.H. Botsford propose un instrument de mesure simple de la contrainte thermique qui échange de la chaleur avec l'environnement à la manière d'un homme. L'indice alors appelé *Wet Globe Température* a plus tard été renommé *Botsball* pour mieux le distinguer de l'indice WBGT. Le Botsball consiste en un seul thermomètre inséré au centre d'un globe de cuivre de six centimètres de diamètre entouré d'un tissu de couleur noire maintenu mouillé. Placé dans un environnement chaud, cet instrument est réchauffé par l'air ambiant et par l'énergie radiante en même temps qu'il se refroidit par l'évaporation de l'eau à sa surface à un taux qui dépend de l'humidité et de la vitesse de l'air (Figure 1). L'équilibre est atteint après environ cinq minutes et la lecture unique est ainsi influencée à la fois par l'ensemble des quatre paramètres définissant l'environnement thermique. L'analogie évidente et singulière entre cette lecture et le WBGT lui a attiré beaucoup d'intérêt en même temps qu'il l'a réduit au rôle d'instrument tertiaire. Cet instrument ne sert en effet le plus souvent qu'à estimer l'indice WBGT qui est lui-même une estimation de la température effective corrigée. Son utilisation est assez répandue, notamment dans les services militaires américains (Onkaram, 1980) qui, depuis 1983, apprécie sa simplicité et son efficacité dans les climats chauds et humides (Jabara, 1988).

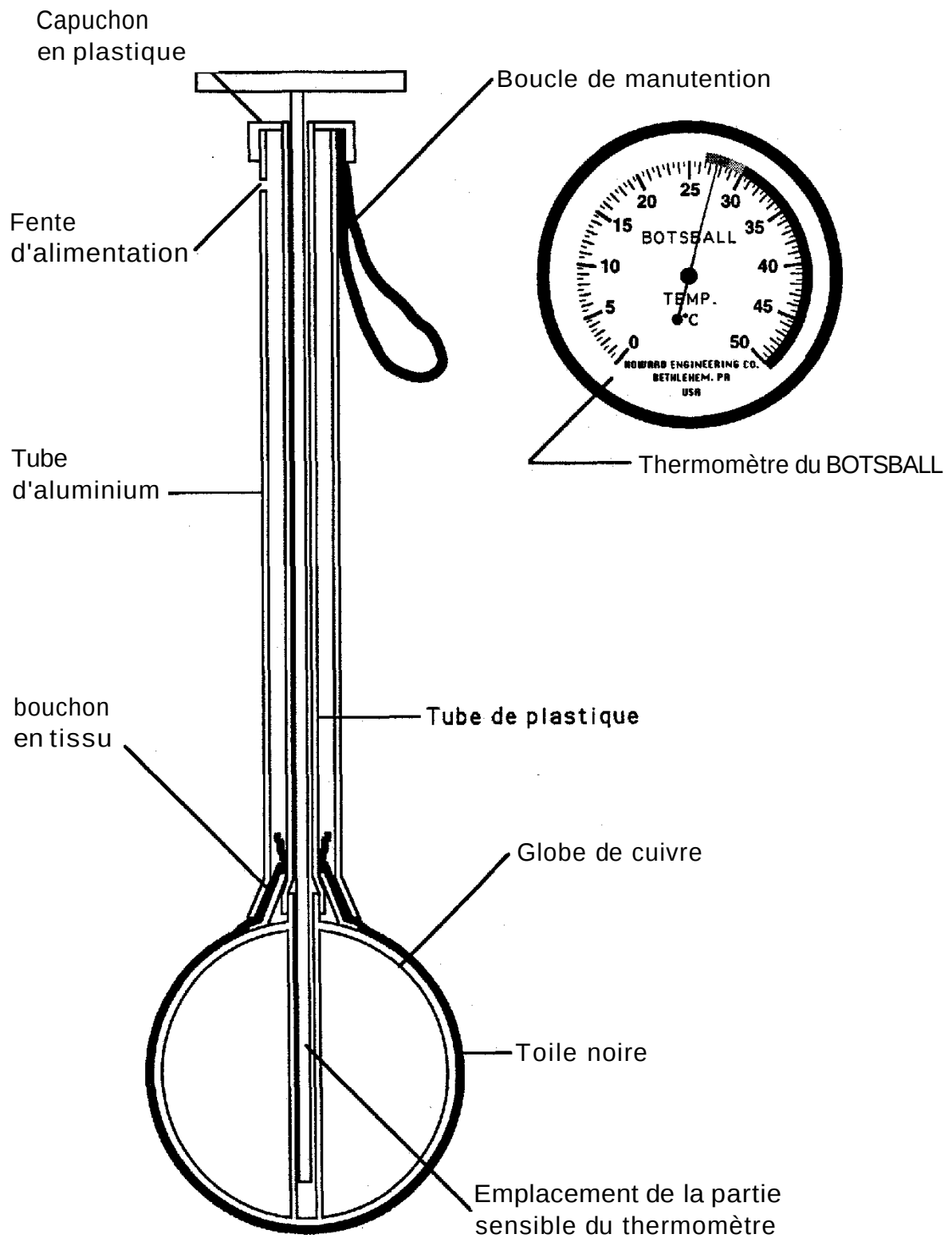


Figure 1. Botsball

Revue de littérature

L'article de J.H. Botsford intitulé "A Wet Globe Thermometer for Environmental Heat Measurement" paru dans l'*American Industrial Hygiene Association Journal* en 1971 voulait proposer un nouvel indice thermique. Les hygiénistes de l'époque y ont plutôt vu un outil de mesure de l'indice WBGT plus simple, moins dispendieux et moins encombrant que les trois thermomètres WBGT (voir Figure 2). Le Botsball présente aussi d'autres avantages:

- Une seule lecture, facile, éliminant le risque de confusion.
- L'équilibre thermique est atteint en cinq minutes seulement.
- L'instrument est robuste.
- Les valeurs Botsball ont une excellente corrélation avec l'ensemble des autres indices de contrainte thermique.
- L'instrument est petit et peut être placé très près de la personne faisant l'objet de l'étude.

Bref, le Botsball est plus simple, moins cher et plus robuste que les instruments de lecture de la température WBGT.

Depuis 1971 et encore aujourd'hui, plusieurs articles discutent de la relation entre les indices WBGT et Botsball (BB). Oestenstad et Sosby (1993) rapportent pas moins de dix équations de régression ($WBGT = aBB + b$) proposées par autant d'auteurs. Dans les faits, la littérature contient un bien plus grand nombre de relations. Ainsi, Oestenstad et Sosby rapportent le modèle universel de Ciriello et Snook (1977). Ces derniers ont néanmoins proposé pas moins de 12 modèles correspondant à des conditions spécifiques d'humidité, de rayonnement et de vitesse de l'air et trois modèles d'application plus générale. Il en va de même pour Parker et Pierce (1984) avec 4 modèles, Lee et Ramsey (1987) avec trois modèles généraux et 12 modèles spécifiques alors que Darnedde (1992) en propose 9. Tel qu'attendu, les modèles d'application générale montrent un coefficient de corrélation plus faible que ceux s'adressant à des conditions environnementales spécifiques. Aussi, Ciriello et Snook ont estimé la précision de prédiction du WBGT à partir du Botsball à $\pm 2,9^{\circ}\text{C}$ pour un modèle général alors qu'elle peut être améliorée jusqu'à $\pm 0,49^{\circ}\text{C}$ par l'utilisation

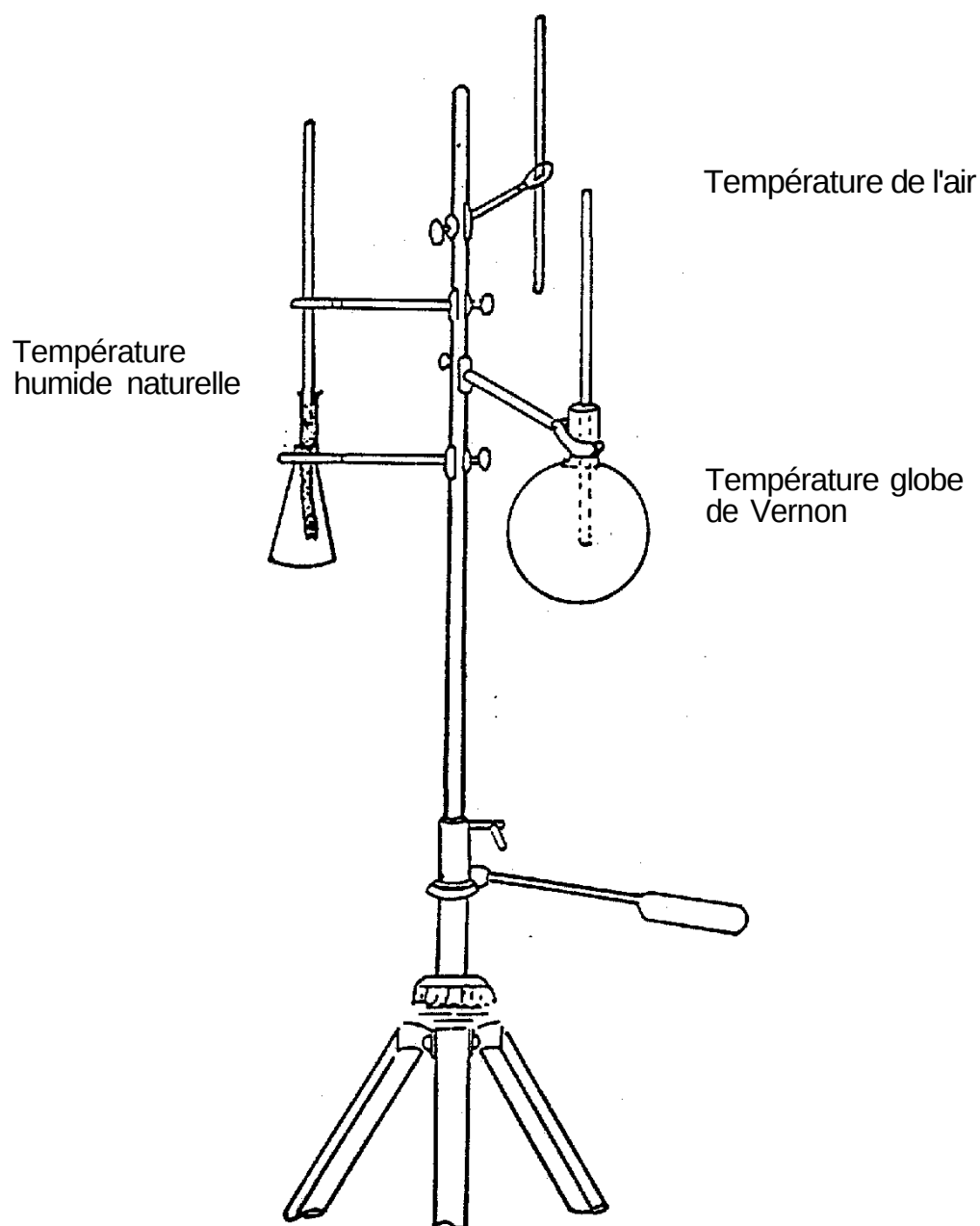


Figure 2. Montage WBGT

d'un modèle spécifique à des conditions connues de vitesse de l'air, d'humidité et de rayonnement.

Peu de chercheurs ont étudié des avenues différentes de relation entre le WBGT et le Botsball. Sudin et al (1972) ont proposé une relation quadratique ($WBGT = aBB^2 + bBB + c$). Ciriello et Snook (1977) et Darnedde (1992) attribuent ces relations non linéaires aux forts taux de rayonnement de même qu'aux larges écarts d'humidité. Il convient de mentionner que plusieurs recherches ont couvert des plages de températures WBGT bien plus larges que la plage d'application normale qui va de 24 à 33°C. De son côté, Darnedde (1992), utilisant une approche basée sur l'analyse du transfert de chaleur, a retenu un modèle de prédiction du WBGT basé à la fois sur la lecture du Botsball et la pression partielle de vapeur d'eau. Le Tableau I résume l'ensemble des principaux modèles recensés dans la littérature.

Tableau I
Relations WBGT-Botsball

Auteurs	Équation de régression	R ²	Plage couverte (WBGT °C)
Oestenstad & Sosby, 1993	$WBGT = 1,08 BB + 3,5$	0,867	26,7 - 39,6
Darnedde, 1992	$WBGT = 1,516 BB + 0,0112 \times (BB \times Pa) - 0,7379 Pa - 2,56$	0,994	19-56
Lee & Ramsey, 1987 (sec)	$WBGT = 1,42 BB - 6,0$	0,934	24 - 40
(Hautetemp.)	$WBGT = 0,86 BB + 8,5$	0,958	
(Autres)	$WBGT = 0,95 BB + 4,5$	0,965	
Parker & Pierce, 1984	$WBGT = 1,5 BB + 8,9$	0,940	19,9 - 46,6
Beshir et al., 1982	$WBGT = 1,01 BB + 2,6$	0,956	0-37
Onkaram et al., 1980	$WBGT = 1,04BB - 0,19$	0,980	27,5 - 32,3
Ciriello & Snook, 1977	$WBGT = 1,07 BB - 0,90$	0,948	16 - 48
Mutchler & Vecchio, 1977	$WBGT = 1,05 BB + 1,14$	0,834	11-42
Jensen & Heins, 1976	$WBGT = 1,05 BB + 0,997$	0,888	11 - 35
Sudin et al., 1972	$WBGT = 0,021 BB^2 + 1,5 BB + 9,5$	0,976	18 - 56
Brief & Confer, 1971	$WBGT = 1,04 BB - 2,64$	0,967	21 - 41

Bien que les coefficients de corrélation de tous ces modèles soient élevés, des variations considérables sont rapportées selon les conditions environnementales sous lesquelles ils sont utilisés. L'utilisation de modèles spécifiques (destinés à des ambiances dont les paramètres thermiques sont connus) suppose l'instrumentation nécessaire à la lecture des différents paramètres de l'environnement et le Botsball perd alors ses principaux avantages de simplicité d'utilisation et d'économie. Quelques auteurs ont exploré des approches intermédiaires qui ne nécessitent qu'une estimation d'un ou de quelques paramètres. C'est le cas de Lee et Ramsey (1987), Parker (1984) et Ciriello et Snook (1977) qui proposent des modèles s'appliquant à des situations industrielles spécifiques où les conditions environnementales peuvent être déduites (par le fait que le procédé est chaud et humide par exemple) ou obtenues des services météorologiques (travail à l'extérieur ou dans des usines très aérées). Ciriello et Snook ont rapporté quelques façons d'estimer l'évaporation à partir de la lecture du Botsball sec.

Dernedde (1992) a pour sa part étudié la contribution marginale de chacune de plusieurs variables de l'environnement ($(T_a - T_{wb})$; $T_a + T_{wb}$; T_g ; $T_a + T_{wb} + T_g$; P_a ; $P_a + T_a + R + V_a$) à l'amélioration de la précision des modèles. Il a retenu la pression partielle de vapeur d'eau comme variable indépendante venant s'ajouter à la lecture Botsball pour améliorer l'équation de régression et faire passer le coefficient de corrélation de 0,947 à 0,994 et l'intervalle de confiance 90% de $\pm 5,08^\circ\text{C}$ à $\pm 1,74^\circ\text{C}$. Surprenamment, ce chercheur n'a pas jugé bon de retenir le modèle utilisant la température globe qui, avec la lecture Botsball, montrait un coefficient de corrélation de 0,998 et un intervalle de confiance de $\pm 0,80^\circ\text{C}$. L'auteur reconnaît que sa recommandation affecte grandement la simplicité d'utilisation du Botsball, la lecture de la pression partielle de vapeur d'eau reposant sur les températures humide forcée et sèche.

Plusieurs auteurs reprochent au Botsball le fait qu'il sous-estime la lecture WBGT lorsque les conditions d'humidité et de vitesse de l'air donnent un taux d'évaporation élevé (Sudin, Ciriello et Snook, Matthew et al, Mutchler et Vecchio, Jabara, Dernedde). Cette observation est supportée du fait que tout l'instrument Botsball subit l'effet de l'évaporation alors que pour l'indice WBGT, les températures sèche et globe y sont insensibles. En 1988, Jabara tente de corriger ces écarts de lecture en réduisant la surface d'évaporation. Il pose un

ruban noir imperméable de 2,54 cm (un pouce) à la circonférence horizontale du globe réduisant ainsi sa surface d'évaporation de 42%. L'auteur rapporte que les lectures du Botsball ainsi modifié se rapprochent de l'indice WBGT et entrevoit même la possibilité de déterminer la surface exacte permettant une lecture directe des valeurs WBGT sur le Botsball. Sur des lectures prises à l'extérieur, les écarts entre le WBGT et le Botsball modifié sont de moins de 0,5°C. Les recherches subséquentes n'ont pas permis de pousser plus loin cette approche.

Objectifs de l'étude

Il ressort de la revue de la littérature que l'estimation de l'indice WBGT à partir du Botsball peut suivre deux cheminement distincts, à savoir, correction de la lecture Botsball par un modèle de régression ou modification de l'instrument par la réduction de sa surface évaporante en apposant un ruban imperméable sur la surface du globe (voir Jabara, 1988). Un choix doit être fait sur l'approche la plus précise et utile. La présente étude vise premièrement à évaluer le niveau de précision atteint par chacune des lectures Botsball modifié et standard dans l'estimation de la température WBGT.

Pour des raisons d'applicabilité, il est impératif de restreindre au minimum le nombre de modèles de régression proposés selon les conditions environnementales. Cette simplification ne doit toutefois pas se faire au détriment d'une perte trop importante de la précision et de la fiabilité de la (des) méthode(s) retenue(s). Le niveau de corrélation doit se situer au-delà de 0,95 et l'erreur-type doit être de l'ordre des meilleurs modèles proposés dans la littérature, soit 0,5°C et moins. Aussi, les variables indépendantes du modèle doivent être limitées au minimum et idéalement se satisfaire des différentes lectures possibles avec le Botsball pour seul instrument.

L'atteinte des objectifs impose une série de mesures strictes. Premièrement, la plage de conditions couverte doit se restreindre aux valeurs WBGT de 24 à 33°C. Cette restriction doit permettre une meilleure linéarité entre les valeurs WBGT et Botsball tout en couvrant entièrement la plage normale d'application de l'indice WBGT. Deuxièmement, cette étude veut explorer plus à fond les possibilités d'utilisation d'autres variables de prédiction à partir du seul instrument Botsball. Ces variables sont la valeur du Botsball sec (avant mouillage) tel que proposé par Ciriello et Snook et la température mesurée par le senseur lorsque retiré à l'extérieur du globe. Cette dernière lecture doit approximer la température de l'air. Or, puisque le Botsball est une intégration des températures mouillée naturelle et globe, la température de l'air peut très bien s'avérer une variable indépendante précieuse.

Méthodologie

Les données venant d'observations en laboratoires constituent la base sur laquelle les analyses ont été faites. Une chambre climatique permet de recréer différentes conditions environnementales par un contrôle indépendant de la vitesse et l'humidité de l'air ainsi que du niveau de rayonnement à des valeurs préétablies (voir Annexe 1). La température de l'air est alors augmentée graduellement pour couvrir la plage de températures WBGT de 24 à 33°C sur le RSS-214. Des observations en industrie ont permis de définir les conditions de l'étude suivant chaque paramètre.

Le taux d'humidité a été maintenu à trois niveaux.

H_0 : Moins de 35% HR

H_1 : Entre de 45% et 55% HR

H_2 : Plus de 65% HR

La mesure de l'humidité relative est préférée à l'humidité absolue parce qu'elle peut être obtenue des services météorologiques pour l'extérieur et beaucoup plus familière aux intervenants sur le terrain. La lecture en continu de ce paramètre détermine le réglage des trois humidificateurs et du taux de changement d'air de la chambre climatique par de l'air extérieur permettant ainsi de maintenir le taux d'humidité relative quasi constant sur toute la plage de températures couverte.

Le niveau de rayonnement est exprimé par la différence entre la température globe et la température de l'air ($T_g - T_a$). Le fait que la littérature rapporte souvent cette façon de mesurer et sa grande facilité de lecture sur le terrain supportent ce choix. Trois niveaux de rayonnement sont générés.

R_0 : Absence ou très faible rayonnement ($T_g - T_a < 2\text{ °C}$)

R_1 : Rayonnement modéré $5\text{ °C} < (T_g - T_a) < 10\text{ °C}$

R_2 : Rayonnement élevé ($T_g - T_a > 12\text{ °C}$)

Un ensemble pouvant comprendre jusqu'à quatre ampoules infrarouges permet d'atteindre et de maintenir le niveau de rayonnement souhaité. Ces ampoules

doivent être situées à environ deux mètres du point de lecture pour assurer une répartition égale de l'énergie rayonnante.

Un ensemble ventilateur-conduit situé à une distance de 2,5 mètres du point de mesure a permis de générer une vitesse de l'air uniforme à quatre niveaux d'intensité.

P_0 : Convection naturelle

P_1 : 1.8 m/sec

P_2 : 3.5 m/sec

P_3 : 5.1 m/sec

Ces valeurs sont représentatives des milieux industriels supportant l'étude (convection naturelle) et des vitesses de l'air rencontrées à l'extérieur. Dans le cas de la convection naturelle, un petit ventilateur orienté en direction opposée au point de lecture assure le brassage de l'air nécessaire au contrôle de l'humidité relative. L'annexe 1 montre l'arrangement du système de contrôle de la vitesse de l'air, de l'humidité et du rayonnement.

Instrumentation

L'instrumentation doit permettre de lire chacun des paramètres de base de l'environnement thermique en plus des indices WBGT, Botsball standard et Botsball modifié. La liste complète des instruments comprend:

- Wibget, série RSS-214 étalonné périodiquement sur montage WBGT (Figure 2).
- Trois Botsballs, modifié, standard et sec.
- Psychromètre, Modèle No 3312-40 Cole-Parmer
- Psychromètre, Vaisala humidity & temperature indicator hmi 31.
- Ventilateur industriel Kent.
- Ventilateur domestique.
- Radiateur électrique.
- Trois humidificateurs domestiques.
- Quatre lampes infrarouges de 250 Watts.
- Anémomètre à fil chaud Kurtz instrument Inc. série 1440.
- Anémomètre à vannes Turbo Meter.

La calibration de l'ensemble de ces instruments a été faite avant le début et, le cas échéant, en cours d'expérimentation. Cet ensemble instrumental est monté dans la chambre climatique ou dans une serre portative pour prise de mesures à l'extérieur avec rayonnement solaire.

Protocole

Chaque session débute dans la chambre climatique préalablement refroidie et bien ventilée. La procédure d'enregistrement des données suit le protocole suivant:

- Stabiliser les paramètres environnementaux (humidité, rayonnement et vitesse de l'air) aux niveaux prescrits.
- Laisser les instruments de mesure s'équilibrer aux conditions du milieu pendant au moins 60 minutes.
- Prendre le premier enregistrement lorsque la température WBGT atteint 24°C.
- Au rythme de 5 à 6 lectures par heure, augmenter progressivement la température WBGT en faisant varier uniquement la température de l'air jusqu'à atteindre une valeur de WBGT qui se situe autour de 33 °C.
- Pour s'assurer que tous les instruments sont à l'équilibre, le Wibget doit afficher la même valeur WBGT pendant au moins 5 minutes avant de faire une lecture.
- Prendre des mesures à chaque variation de 0,2 à 0,5 °C de la température WBGT.

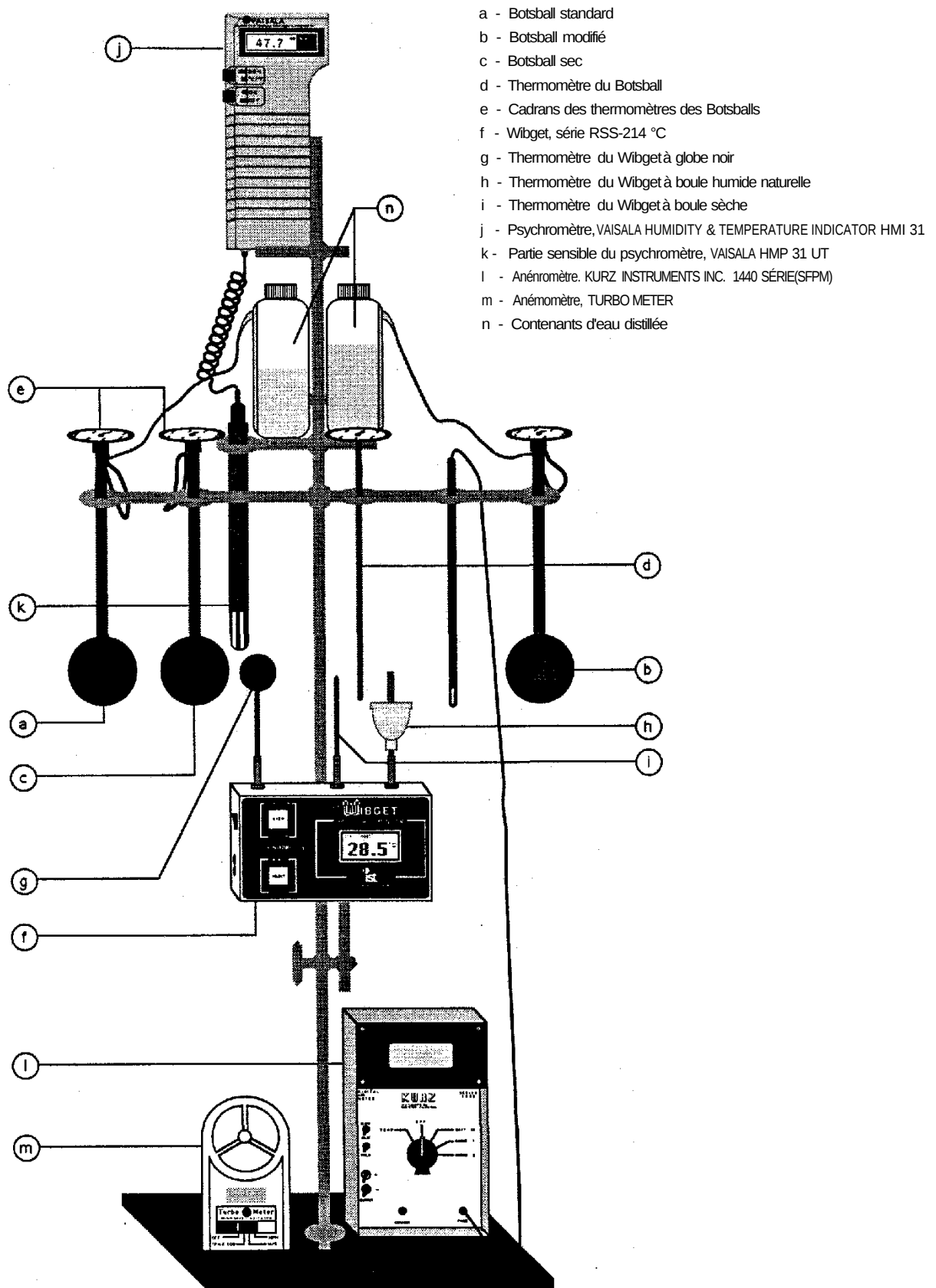


Figure 3. Montage instrumental

- La lecture des températures Botsball doit se faire toujours en se positionnant verticalement au-dessus des cadrans.

Immédiatement après avoir vérifié les trois paramètres de la condition climatique étudiée, enregistrer les données suivantes:

- WBGT (int): la valeur du WBGT intérieur donnée par le Wibget
- WBGT (ext): la valeur du WBGT extérieur donnée par le Wibget
- Ta: température de l'air
- Tg: température du globe noir
- Tbm: température humide
- Botsball(std): la valeur affichée par le Botsball standard
- Botsball(mod): la valeur affichée par le Botsball modifié
- Botsball(sec): la valeur affichée par le Botsball sec

En cas de réajustement des appareils ou d'ajout d'eau distillée, rabaisser la température WBGT d'environ 2°C et augmenter cette dernière progressivement jusqu'à atteindre le niveau où le problème est survenu, puis continuer l'expérience.

Résultats

Chacun des 29 ensembles de conditions environnementales présentés au Tableau II a fait l'objet d'une série complète de lectures depuis 24 °C (WBGT) jusqu'à 33°C. Chaque série représente entre 25 et 30 enregistrements des paramètres de base et des températures WBGT et Botsball (2 versions) pour un grand total de 849 observations complètes.

Tableau II
Conditions environnementales étudiées en chambre climatique

	Humidité < 35%			45% < Humidité < 55%			Humidité > 65%		
<i>vitesse de</i>	<i>Rayonnement</i>			<i>Rayonnement</i>			<i>Rayonnement</i>		
<i>l'air</i>	<i>Sans</i>	<i>Mod.</i>	<i>Élevé</i>	<i>Sans</i>	<i>Mod.</i>	<i>Élevé</i>	<i>Sans</i>	<i>Mod.</i>	<i>Élevé</i>
<i>Convection naturelle</i>	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
<i>1,8 m/sec</i>	✓	✓	✓				✓	✓	✓
<i>3,5 m/sec</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>5,1 m/sec</i>	✓	✓	✓				✓	✓	✓

Analyse des données

Chaque série de données expérimentales obtenue de chacune des 29 conditions climatiques a d'abord fait l'objet d'une analyse de régression sur les relations entre les valeurs WBGT (variable dépendante) et le Botsball standard aussi bien que le Botsball modifié (variable indépendante). Ensuite, l'étude de la contribution de chaque paramètre de base pris séparément (humidité, rayonnement et vitesse de l'air) permet de retenir le (les) plus important(s) et de regrouper les conditions environnementales dans le but d'en arriver à un nombre restreint de modèles, facilitant d'autant l'utilisation du Botsball. Finalement, la contribution de quelques variables indépendantes à améliorer le coefficient de détermination des droites de régression et à réduire la variation non expliquée a été évaluée pour chaque regroupement de conditions.

Analyse pour chaque condition climatique

Dans cette première étape d'analyse et pour chaque série de données correspondant à une condition climatique bien déterminée telle que définie au Tableau II, nous avons:

- calculé les paramètres des droites de régression qui expriment le WBGT en fonction des valeurs Botsball standard et le WBGT en fonction des valeurs Botsball modifié.
- calculé le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur-type (ou écart-type) pour chaque équation et tracé sa droite de régression.
- réalisé les tests de validation nécessaires (Student et Fisher) à un niveau de confiance de 95% pour s'assurer que les valeurs élevées du coefficient de détermination R^2 ne sont pas le fruit du hasard.

Cette étape a produit 29 modèles mathématiques correspondant aux conditions environnementales du Tableau II pour chacune des versions standard et modifiée de l'instrumentation Botsball. Il serait trop long de rapporter ces équations mais l'analyse de ces droites de régression révèle que:

- il existe une corrélation positive parfaitement linéaire entre la température WBGT et les températures Botsball standard, ainsi qu'entre la température WBGT et les températures Botsball modifié et ce, dans la totalité des conditions climatiques observées.
- les coefficients de détermination se situent autour de 99% dans la totalité des cas avec une erreur-type ne dépassant pas 0,6 °C.
- le Botsball modifié donne des valeurs plus proches de la température WBGT que le standard et une meilleure corrélation.
- plus les conditions environnementales sont sèches, plus l'écart se creuse entre les versions modifiée et standard du Botsball. Cette tendance s'est maintenue sous différents niveaux de rayonnement et de vitesse de l'air.
- les deux versions Botsball donnent de meilleurs résultats dans les milieux humides et l'amélioration est plus importante en ce qui concerne le Botsball standard.
- l'influence du niveau d'humidité ou du niveau de rayonnement est beaucoup plus importante que celle du niveau de vitesse de l'air.

Pour s'assurer de la validité de ces différents modèles, nous les avons appliqués à des données prises durant l'été 1996 à l'extérieur de même que dans des milieux industriels. Les résultats sont très satisfaisants dans la totalité des cas, respectant les mêmes proportions de corrélation et d'erreur-type que celles obtenues en laboratoire.

Analyse de la contribution marginale des paramètres de base

Les conditions climatiques rencontrées dans les milieux industriels, que se soit à l'intérieur ou à l'extérieur avec ou sans charge solaire, sont très variées. Offrir un modèle correspondant à chacune des 29 conditions climatiques étudiées ne peut satisfaire les utilisateurs intéressés par la simplicité du Botsball. Dans tous les cas, un tel nombre de modèles ne peut qu'entraîner la confusion et augmenter les possibilités d'erreur d'interprétation. L'acceptation et l'utilisation du Botsball

par les intervenants passent nécessairement par une réduction substantielle du nombre de modèles. Le regroupement des conditions climatiques dont les modèles donnent sensiblement les mêmes résultats et le développement d'un modèle spécifique à ce groupe sont donc nécessaires. Ce regroupement doit se faire à la lumière de l'analyse de la contribution de chacun des paramètres de base de l'environnement thermique.

Les trois paramètres contrôlés (vitesse, humidité et rayonnement) ont été étudiés séparément pour connaître la contribution de chacun à expliquer les fluctuations dans les observations de la variable dépendante WBGT. Une information qualitative correspondant aux niveaux de chaque paramètre (voir méthodologie) a été introduite.

Les modalités de chaque paramètre sont des variables auxiliaires. Elles sont introduites avec d'autres variables explicatives quantitatives dans les modèles de régressions linéaires multiples. Ainsi l'étude de chaque paramètre consiste à mesurer la contribution marginale de ces variables auxiliaires. L'analyse de cette démarche montre que:

- la séparation des conditions climatiques selon la présence ou l'absence de rayonnement permet une réduction de la variation non expliquée de plus de 50%. Dans le cas du taux d'humidité, cette amélioration dépasse 65%. Par contre la séparation selon la vitesse de l'air ne permet qu'une réduction ne dépassant pas 15% de la variation non expliquée.
- le Botsball modifié est beaucoup plus affecté par l'humidité et le rayonnement que par la vitesse de l'air. Ceci demeure vrai pour la version standard quoiqu'il soit légèrement plus affecté par la vitesse de l'air.
- le regroupement des variables auxiliaires rayonnement modéré et rayonnement fort en une seule variable "présence de rayonnement" n'apporte qu'une très faible fluctuation des performances obtenues.
- l'introduction de l'une ou l'autre des variables "température de l'air" ou "température du globe" explique une forte partie de la variation expliquée par l'introduction de la variable "vitesse de l'air".

Le Tableau III résume les six conditions climatiques majeures autour desquelles cette analyse nous a permis de regrouper l'ensemble des 29 conditions couvertes.

Tableau III
Ambiances climatiques dominantes.

	<i>Sans rayonnement</i>	<i>Avec rayonnement</i>
<i>Taux d'humidité < 35%</i>	✓	✓
<i>45% < Taux d'humidité < 55%</i>	✓	✓
<i>Taux d'humidité > 65%</i>	✓	✓

Contribution de variables indépendantes

La méthode statistique de régression linéaire dite "pas à pas" a permis de choisir la meilleure combinaison des variables explicatives et d'améliorer les modèles développés pour chaque regroupement de conditions apparaissant au Tableau III. L'introduction de la température de l'air comme variable indépendante apporte la meilleure amélioration des performances des modèles développés en termes de coefficient de détermination (R^2) aussi bien que d'erreur-type (S). Les autres variables étudiées sont la température globe, la température mouillée et la vitesse de l'air. Après vérification, il appert que la tige-thermomètre du Botsball, lorsque retirée du globe, donne une lecture précise de la température de l'air. Le critère de simplicité d'utilisation s'en trouve respecté. Ainsi tous les modèles proposés sont exprimés en fonction des variables indépendantes "température de l'air" et "température Botsball" (BB).

Selon le choix de l'utilisateur d'utiliser un Botsball modifié (Tableau IV) ou un Botsball standard (Tableau V), les tableaux suivants résument les différentes formules de transformation applicables selon le taux d'humidité et la présence de

rayonnement. Pour l'ensemble des six modèles retenus pour les Botsballs modifié et standard, la corrélation mesurée par le coefficient de détermination et l'erreur-type est meilleure que les objectifs fixés de 0,95 et 0,5°C respectivement. Il appert que l'introduction de la température de l'air comme variable de prédiction améliore particulièrement l'exactitude du Botsball standard au point où cet instrument se montre alors quasi aussi performant que la version modifiée. Les intervalles de confiance 90% de chaque modèle varient entre $\pm 0,16^{\circ}\text{C}$ et $\pm 0,70^{\circ}\text{C}$ pour la version standard contre $\pm 0,08^{\circ}\text{C}$ et $\pm 0,67^{\circ}\text{C}$ dans le cas du Botsball modifié.

Tableau IV
Formules de conversion pour le Botsball modifié

MILIEU SANS RAYONNEMENT	
Taux d'humidité > 65%	$WBGT = 0,92 BB + 0,10 Ta - 0,78$ $R^2 = 0,99$ $S = 0,13$ Nombre d'observations = 128
45% < Taux d'humidité < 55%	$WBGT = 0,83 BB + 0,15 Ta + 0,04$ $R^2 = 0,99$ $S = 0,05$ Nombre d'observations = 45
Taux d'humidité < 35%	$WBGT = 0,71 BB + 0,21 Ta + 0,81$ $R^2 = 0,98$ $S = 0,37$ Nombre d'observations = 129
MILIEU AVEC RAYONNEMENT	
Taux d'humidité > 65%	$WBGT = 0,82 BB + 0,20 Ta + 0,67$ $R^2 = 0,98$ $S = 0,29$ Nombre d'observations = 227
45% < Taux d'humidité < 55%	$WBGT = 0,85 BB + 0,18 Ta - 0,75$ $R^2 = 0,99$ $S = 0,12$ Nombre d'observations = 90
Taux d'humidité < 35%	$WBGT = 1,06 BB + 0,08 Ta - 3,45$ $R^2 = 0,97$ $S = 0,33$ Nombre d'observations = 230

BB: Température Botsball

Ta: température de l'air

Tableau V
Formules de conversion pour le Botsball standard

MILIEU SANS RAYONNEMENT	
Taux d'humidité > 65%	$WBGT = 0,80 BB + 0,21 Ta - 0,10$ $R^2 = 0,99$ $S = 0,18$ Nombre d'observations = 128
45% < Taux d'humidité < 55%	$WBGT = 0,77 BB + 0,21 Ta + 0,50$ $R^2 = 0,99$ $S = 0,16$ Nombre d'observations = 45
Taux d'humidité < 35%	$WBGT = 0,61 BB + 0,30 Ta + 1,50$ $R^2 = 0,98$ $S = 0,40$ Nombre d'observations = 129
MILIEU AVEC RAYONNEMENT	
Taux d'humidité > 65%	$WBGT = 0,70 BB + 0,29 Ta + 0,63$ $R^2 = 0,98$ $S = 0,25$ Nombre d'observations = 227
45% < Taux d'humidité < 55%	$WBGT = 0,81 BB + 0,18 Ta + 1,45$ $R^2 = 0,99$ $S = 0,10$ Nombre d'observations = 90
Taux d'humidité < 35%	$WBGT = 0,84 BB + 0,21 Ta - 0,05$ $R^2 = 0,96$ $S = 0,43$ Nombre d'observations = 230

BB: Température Botsball

Ta: température de l'air

Discussion

Le fait de restreindre la plage de températures WBGT couverte entre 24 et 33°C a permis d'obtenir des coefficients de détermination très élevés et par conséquent une meilleure corrélation. Cette restriction ne limite en rien l'applicabilité de cet indice. Comme le rappelle Beshir (1981), l'indice WBGT est dérivé de la température effective corrigée pour le rayonnement (TECR). C'est sur la base de cette dernière que les limites WBGT ont été arrêtées suite aux travaux de Lind qui mettaient en relation la TECR et la température rectale d'équilibre. Or la plage couverte par Lind était de 25 à 32,5°C. L'utilisation maintes fois observée de l'indice WBGT au-delà de cette plage est non supportée.

Les deux versions Botsball permettent une corrélation légèrement meilleure sous des conditions humides. Jabara (1988) rapporte que les services militaires américains préfèrent utiliser cet instrument sous des climats chauds et humides. L'écart entre les lectures obtenues sur les versions standard et modifiée du Botsball est d'autant plus important que les conditions environnementales sont sèches. La vitesse de l'air favorise aussi cet écart mais dans une moindre mesure. Finalement, le niveau de rayonnement n'influence pas significativement cette différence.

La proportion de la variation non expliquée d'une équation de régression utilisant la seule variable Botsball est réduite dans une plus forte proportion par l'introduction de la température de l'air comme variable indépendante que par celle de la température globe. Darnedde (1992) avait obtenu une forte amélioration en introduisant le flux de chaleur par rayonnement. Curieusement, cet auteur ne rapporte pas le bénéfice obtenu par l'introduction de la température de l'air.

Le taux d'humidité qualifié selon trois niveaux et le rayonnement selon sa présence ou son absence permettent d'atteindre des niveaux très élevés de précision. Aussi, l'introduction de la température de l'air améliore la performance des modèles du Botsball standard dans une proportion plus forte que pour l'instrument modifié. Pour cette raison, il n'est pas justifié de modifier l'instrument pour rapprocher les lectures de la température WBGT. Cette modification peut

entraîner des erreurs et affecter la capillarité du tissu dont est recouvert le globe. Dans la pratique, la température de l'air peut être lue simplement avec le Botsball trois minutes après avoir retiré le thermomètre-tige du globe, en le protégeant du rayonnement le cas échéant. Ce choix laisse donc à l'intervenant sur le terrain le choix des six modèles de prédiction du Tableau V.

L'influence du taux d'humidité et de rayonnement est trop importante pour réduire davantage le nombre de modèles sans affecter la précision. Le choix entre le milieu sans rayonnement ou avec rayonnement peut se baser sur la différence entre la température de l'air et la lecture du Botsball sec. En laboratoire, cette dernière température s'est située à mi-chemin entre les températures sèche et globe, de sorte qu'une différence de 3°C ou plus entre cette température "Botsball sec" et la température de l'air indique de choisir le modèle avec rayonnement. Ciriello et Snook avaient émis cette possibilité dès 1977.

Pour ce qui est de la détermination de l'humidité, l'utilisateur peut décider du niveau approprié par différents moyens. Si l'espace considéré est à l'extérieur ou dans un espace intérieur fortement ventilé naturellement, la valeur de l'humidité relative des services météorologiques peut être utilisée directement (Dernedde 1992). Dans le cas d'installations intérieures plus fermées, les conditions d'humidité sont souvent déterminées par le procédé et peuvent être connues. Par exemple, dans le secteur des pâtes et papiers ou des teintureries, on assumera un taux d'humidité plus élevé que 65%. Par contre, dans les salles de cuves d'une aluminerie ou dans les aciéries, les conditions de moins de 35% prévalent. Pour les cas où on ne peut déduire l'humidité, quelques lectures périodiques, si elles se montrent cohérentes, peuvent permettre de ne pas avoir à relire ce paramètre à chaque relevé. La lecture de l'humidité relative demeure plus accessible que la pression partielle de vapeur d'eau proposée par Dernedde (1992).

Conclusion

L'approche méthodologique retenue pour cette étude a permis d'obtenir un ensemble de données plus complet et cohérent que l'ensemble des études recensées. Les équations de régression obtenues sont précises et permettent de couvrir l'ensemble des ambiances chaudes rencontrées en industrie et à l'extérieur. L'utilisation de tableaux tels que proposés à l'Annexe 2 permet aux intervenants intéressés par le Botsball de lire la température WBGT directement et facilement, utilisant ce seul instrument, selon les modalités discutées dans le présent rapport.

La pertinence de l'introduction de la température de l'air dans les équations de régression linéaire multiple en sus de la température Botsball était prévisible. Le Botsball étant en fait un globe noir mouillé, l'insertion de la température de l'air complète l'ensemble des lectures qui forment l'indice WBGT soit, les températures sèche, mouillée et globe. Une recherche sur internet a permis d'apprendre que le Commanding General du U.S. Army utilise la formule $WBGT = 0,8 BB + 0,2 T_a$. La performance statistique obtenue après insertion de la température de l'air explique pourquoi le cheminement visant la modification de l'instrument par la réduction de la surface évaporante n'a pas été retenu.

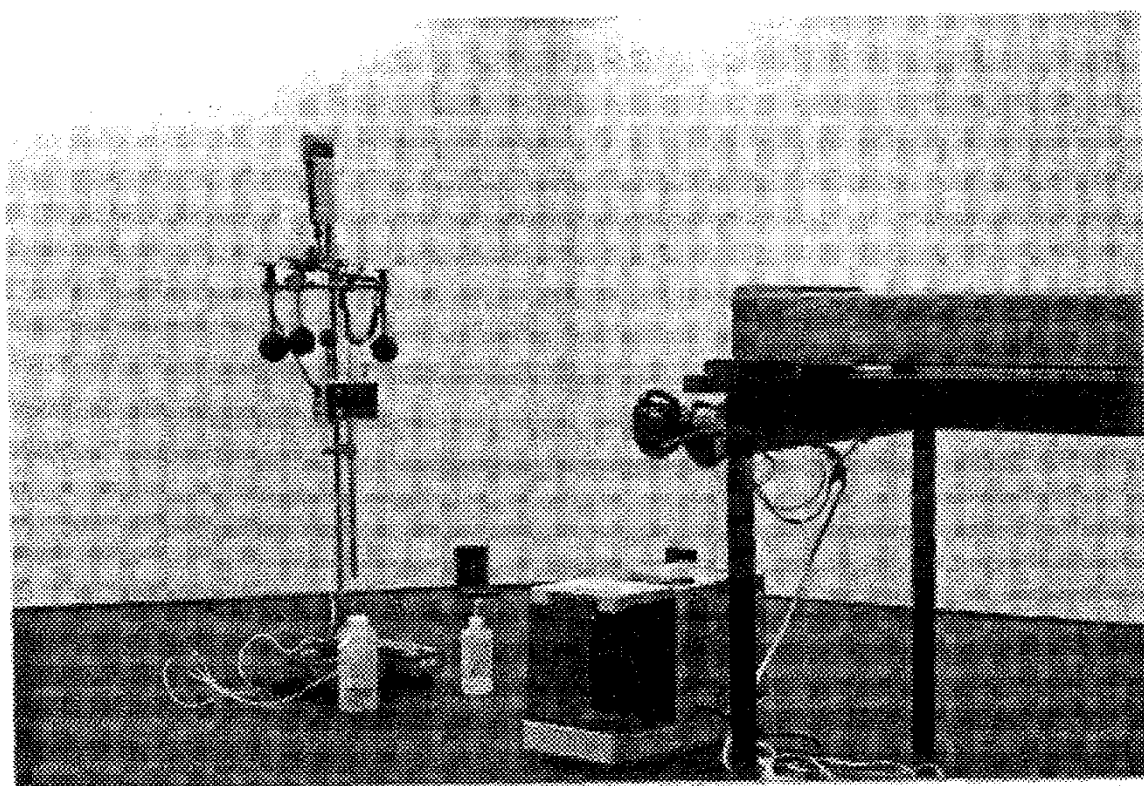
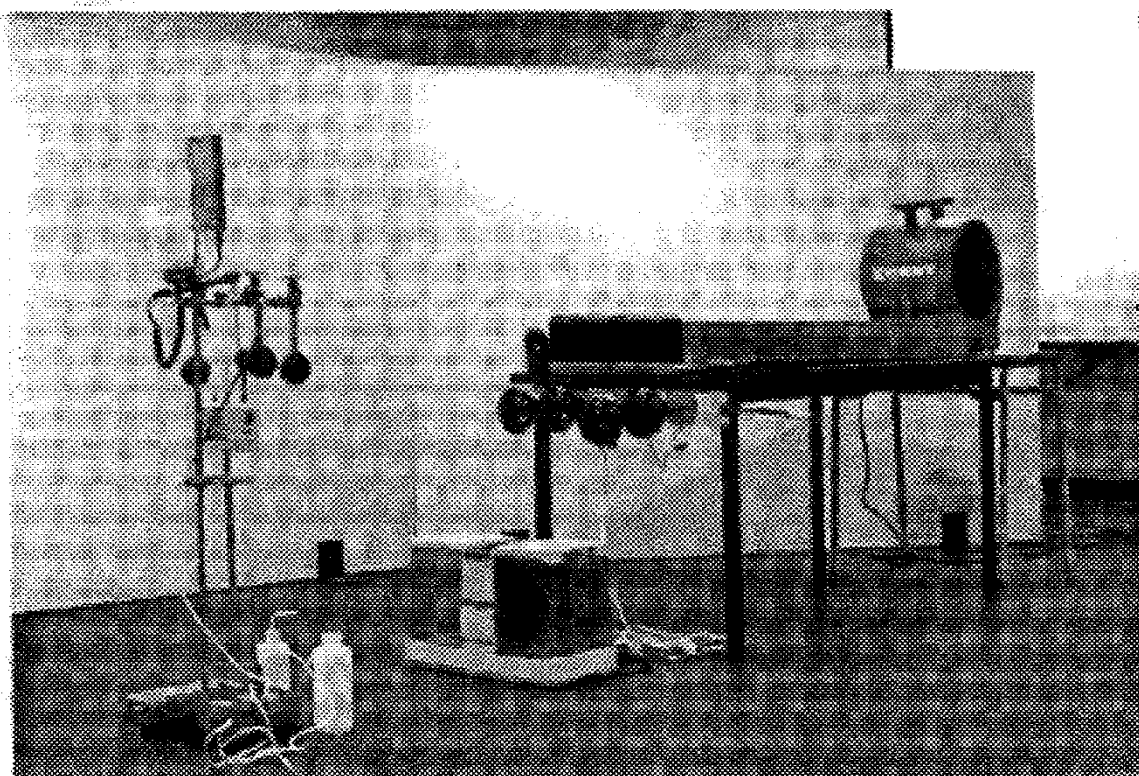
Les six modèles proposés dépassent les objectifs visés en termes de coefficient de corrélation ($\geq 0,95$) et d'erreur-type ($\leq 0,5^\circ\text{C}$). Leur nombre restreint rencontre le double objectif de simplicité d'application et de valeur statistique. L'utilisation du Botsball est moins avantageuse lorsque des lectures complémentaires sont nécessaires pour statuer sur la présence de rayonnement et sur la classe d'humidité.

Références

1. Beshir, M.Y.; Ramsey, J.D.; Burford, C.L.: Threshold Values for the botsball: A Field Study of Occupational Heat. *Ergonomics* 25(3):247-254 (1982).
2. Bosford, J. H.: A Wet Globe Thermometer for Environmental Heat Measurement. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 31: 1-10 (1971).
3. Brief, R. S.; Confer, R.G.: Comparison of Heat stress Indices. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 332: 1 1-16 (1971).
4. Ciriello, M.S.; Snook, S.H.: The Prediction of WBGT from the Botsball, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 38:264-271 (1977).
5. Lee, C.H.; Ramsey, J.D.: Relationship Between WBGT and WGT Under Varying Thermal Components. *Trends in Ergonomics/Human Factors IV*: 359-365 (1987)
6. Darnedde, E.: A Correlation of the Wet Bulb Globe Temperature And Botsball Heat Stress Indexes for Industry, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 53: 157-220 (1992).
7. Jabara, J. W.: Comparison of the Web Bulb Globe Temperature and a Modified Botsball Thermometer in an Outdoor environment. *Appl. Ind. Hyg.* 3:303-309 (1988).
8. Jensen, R.C.; Heins, D.A.: Relationship between Several Prominent Heat Stress Indices. DHEW (NIOSH) Publication No. 77-109 (1976).
9. Matthew, T.W.; Hubbard, R.W.; Szlyk, P.C.; Armstrong, L.E.; Kerstein. M.D.: Monitoring of Heat Stress. *Mil. Med.* 152:399-404 (1987).
10. Mutchler, J.E.; Vecchio, J.L.: Empirical Relationships Among Heat Stress Indices in 14 Hot Industries. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 38: 253-262 (1977).
11. National Institute for Occupational Safety and Health. Criteria for a Recommended Standard... Occupational Exposure to Hot Environments, Revised Criteria 1986. DHHS (NIOSH) Pub. No. 86.113. US. Government Printing Office, Washington, DC (1986).
12. Oestenstad, R.K.; Sosby R.L.: A Comparison of WGT Measured by a Modified Bostball and WBGT in a Hot, Dry Environment, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 8:425-536 (1993).
13. Onkaram, B.; Stroschein, L.A.; Goldman, R.F.: Three Instruments for assessment of WBGT and a comparison with WGT (Botsball). *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 41:634-641 (1980).
14. Parker, R.D.R.; Pierce, F.D. Comparison of Heat Stress Measuring Techniques in a Steel Mill. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 45:405-415 (1984).
15. Sudin, D.; Dukes-Dobis, F.N.; Jensen, R.; Humphreys, C.: Comparison of the ACGIH TLV for Heat Stress with other Heat Stress Indices. Presented at the American Industrial Hygiene Conference, San Francisco, CA (1972).
16. Yaglou, C.P.; Minard, D.: Control of Heat Casualties at Military Training Centers, *Arch. Indust. Health.* 16:302 (1957).

Annexe 1

**Dispositif de contrôle de la vitesse de l'air,
de l'humidité et du rayonnement**



Annexe 2

Recommandations aux utilisateurs

Recommandations aux utilisateurs

Des observations faites en laboratoire aussi bien que sur le terrain ont démontré que le Botsball constitue une alternative valable de lecture de la température WBGT. L'avantage de cet instrument réside dans sa simplicité, son coût et sa robustesse. Une analyse détaillée de la procédure d'utilisation de cet appareil de mesure a été effectuée. Les quelques recommandations qui suivent ont pour but de faire profiter les usagers de nos expériences sur la façon d'utiliser le Botsball et ainsi minimiser le risque d'erreur.

État et fiabilité du matériel

Le Botsball est un appareil très simple, facile à utiliser, fiable et beaucoup moins fragile que d'autres appareils électroniques de mesure du WBGT. Certaines mesures de contrôle doivent cependant être prises pour en assurer sa fiabilité. En effet, la fiabilité du Botsball reposant sur un seul thermomètre, il est donc conseillé de respecter les limites de ce dernier en évitant de l'exposer à des conditions de températures qui dépassent ses limites de lecture.

Sur réception du Botsball, il faut vérifier le thermomètre en comparant sa lecture avec celle d'un autre thermomètre certifié et calibré. Un simple thermomètre au mercure peut suffire. Il suffit d'immerger les parties sensibles des deux thermomètres dans l'eau et de faire varier la température sans dépasser les limites suggérées par le fabricant.

Avant chaque utilisation, une vérification de l'état du tissu noir qui recouvre le globe de cuivre s'impose. Aussi, il faut rechercher les signes d'usure, de déchirure ou l'accumulation de saleté et au besoin, changer le tissu en suivant les consignes du fabricant (feuille jaune accompagnant le Botsball).

Manipulation du Botsball

Les erreurs de manipulations comptent pour la majeure partie de l'incertitude dans l'utilisation du Botsball. Il faut éviter de prendre les mesures dans des endroits où il peut y avoir des changements brusques de température, rayonnement ou du taux d'humidité. Le courant d'air causé par l'ouverture d'une

porte (à l'intérieur) ou un passage nuageux (à l'extérieur) peuvent changer significativement les conditions climatiques et fausser les données.

L'eau distillée utilisée devant être au préalable acclimatée aux conditions mesurées, il est recommandé de laisser le contenant dans l'ambiance faisant l'objet de mesures pour une durée de 30 minutes à quelques heures. Le temps nécessaire augmente avec le volume du contenant. La méthode retenue pour obtenir la valeur WBGT nécessite, en plus de la lecture du Botsball (BB), celle de la température de l'air. Cette dernière peut être mesurée avec le thermomètre du Botsball. Il suffit de retirer la tige-thermomètre du globe et lire la température de l'air après trois minutes (la partie sensible du thermomètre doit alors être protégée des rayonnements solaires ou autres).

Les tableaux de lecture du WBGT se divisent en deux parties selon qu'il y ait absence ou présence de rayonnement. La présence des rayonnement peut être détectée en se servant simplement du Botsball sec, c'est-à-dire avant de l'humecter. Cette valeur de Botsball sec est comparée avec celle de la température de l'air. Si l'écart entre ces lectures est de 3 °C ou plus, on doit alors conclure qu'il y'a présence de rayonnement significatif et utiliser la section "avec rayonnement" du tableau approprié. Il ne faut pas confondre cette lecture du Botsball sec avec celle de la température du globe lue sur d'autres instruments.

Pour la lecture de la température Botsball (BB), on doit s'assurer que le globe soit maintenu entièrement mouillé en tout temps. Le dessous du globe s'asséchera en premier si l'eau venait qu'à manquer. Dans des conditions asséchantes (air sec ou vitesse de l'air élevée), il est conseillé d'utiliser le tube capillaire pour acheminer directement l'eau depuis la gourde jusqu'à l'appareil. Le petit réservoir d'eau sur l'appareil même peut s'épuiser en quelque 15 minutes.

Une fois l'appareil humecté, il faut attendre 5 à 10 minutes avant de prendre une première lecture afin de lui permettre de s'équilibrer aux conditions climatiques. La même lecture est reprise après 10 à 15 minutes pour vérifier que les conditions sont demeurées stables. Pour chaque condition climatique, un minimum de 3 lectures Botsball sont nécessaires. Il convient de relire la température de l'air (Ta) après ces trois lectures Botsball avant d'utiliser les tableaux de conversion WBGT.

Formules et tableaux de conversion

Pour faciliter l'application des formules mathématiques de conversion et éviter les erreurs de calculs, deux tableaux pour chaque type de Botsball (standard ou modifié), selon qu'il y ait présence ou non des rayonnement, sont proposés. (Nous recommandons d'utiliser le Botsball dans sa version standard, tel qu'il parvient du manufacturier.) La valeur WBGT est lue à la croisée des valeurs Botsball et de la température de l'air. Chaque cellule du tableau contient trois valeurs du WBGT, la première est pour un milieu humide ($HR > 65 \%$), la seconde pour un milieu modérément humide ($45 \% < HR < 55 \%$) et la troisième pour un milieu sec ($HR < 35 \%$).

Pour ce qui est de la détermination de l'humidité, l'utilisateur peut décider du niveau approprié par différents moyens. Si l'espace considéré est à l'extérieur ou dans un espace intérieur fortement ventilé naturellement, la valeur de l'humidité relative des services météorologiques peut être utilisée directement. Dans le cas d'installations intérieures plus fermées, les conditions d'humidité sont souvent déterminées par le procédé et peuvent être connues. Par exemple, dans le secteur des pâtes et papiers ou des teintureries, on assumera un taux d'humidité plus élevé que 65%. Par contre, dans les salles de cuves d'une aluminerie ou dans les aciéries, les conditions de moins de 35% prévalent. Pour les cas où on ne peut déduire l'humidité, quelques lectures périodiques, si elles se montrent cohérentes, peuvent permettre de ne pas avoir à relire ce paramètre à chaque relevé.

Ta		24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
BB	a	23.7	23.8	23.8	23.9	23.9	24.0	24.0	24.1	24.1	24.2	24.2	24.3	24.3	24.4	24.4	24.5	24.5	24.6	24.6	24.7	24.7	TABLEAU DE CONVERSION BOTSBALL MODIFIÉ VS WBGT MILIEU SANS RADIATIONS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																

BB	Ta	24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0		
24.0	a	23.9	24.0	24.1	24.2	24.3	24.4	24.5	24.6	24.7	24.8	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9														
	b	24.0	24.1	24.2	24.3	24.4	24.5	24.6	24.7	24.8	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0														
	c	24.0	24.0	24.1	24.1	24.1	24.2	24.2	24.3	24.3	24.4	24.4	24.4	24.4	24.5	24.5	24.6	24.6	24.6	24.7	24.7	24.8														
24.5	a		24.4	24.5	24.6	24.7	24.8	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4													
	b		24.5	24.6	24.7	24.8	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5													
	c		24.5	24.6	24.6	24.6	24.7	24.7	24.8	24.8	24.8	24.9	24.9	25.0	25.0	25.1	25.1	25.2	25.2	25.2	25.3	25.3	25.3													
25.0	a			24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9												
	b			25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0												
	c			25.1	25.1	25.2	25.2	25.3	25.3	25.4	25.4	25.5	25.5	25.5	25.6	25.6	25.7	25.7	25.7	25.8	25.8	25.9	25.9	26.0	26.1											
25.5	a				25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4											
	b				25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5											
	c				25.7	25.7	25.7	25.8	25.8	25.9	25.9	25.9	26.0	26.0	26.1	26.1	26.1	26.2	26.2	26.3	26.3	26.3	26.4	26.4	26.5	26.6										
26.0	a					25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9										
	b					26.1	26.2	26.3	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0									
	c					26.2	26.3	26.3	26.4	26.4	26.4	26.5	26.5	26.6	26.6	26.6	26.7	26.7	26.8	26.8	26.8	26.9	26.9	27.0	27.0	27.0	27.1	27.2								
26.5	a						26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4									
	b						26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7								
	c						26.8	26.8	26.9	27.0	27.0	27.1	27.1	27.2	27.2	27.3	27.3	27.3	27.4	27.4	27.4	27.5	27.5	27.5	27.6	27.6	27.6	27.7	27.8							
27.0	a							26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9								
	b							27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4					
	c							27.4	27.4	27.5	27.5	27.6	27.6	27.7	27.7	27.8	27.8	27.9	27.9	28.0	28.0	28.1	28.1	28.1	28.2	28.2	28.3	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.7	28.8	28.9	29.0
27.5	a								27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9		
	b								27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3
	c								27.9	28.0	28.0	28.1	28.1	28.1	28.2	28.2	28.3	28.3	28.3	28.4	28.4	28.5	28.5	28.6	28.6	28.7	28.7	28.8	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.3	29.4
28.0	a									27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	
	b									28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5		
	c									28.5	28.6	28.6	28.7	28.7	28.8	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8
28.5	a										28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9
	b										28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2
	c										29.1	29.1	29.2	29.2	29.3	29.3	29.4	29.4	29.5	29.5	29.6	29.6	29.7	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9
29.0	a											29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4
	b											29.2	29.3	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5
	c											29.7	29.7	29.7	29.8	29.8	29.9	29.9	30.0	30.0	30.1	30.1	30.1	30.2	30.2	30.3	30.3	30.4	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1
29.5	a												29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	
	b												29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	
	c												30.2	30.3	30.3	30.4	30.4	30.5	30.5	30.6	30.6	30.7	30.7	30.7	30.7	30.8	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	
30.0	a													30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	
	b													30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	
	c													30.8	30.8	30.9	30.9	31.0	31.0	31.1	31.1	31.1	31.2	31.2	31.2	31.3	31.3	31.4	31.4	31.5	31.5	31.6	31.6	31.7	31.8	
30.5	a														30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	
	b														30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	
	c														31.4	31.4	31.4	31.5	31.5	31.6	31.6	31.6	31.7	31.7	31.8	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	
31.0	a															31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	
	b															31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	33.0	33.1	
	c															31.9	32.0	32.0	32.1	32.1	32.2	32.2	32.3	32.3	32.4	32.4	32.5	32.5								

Ta		24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0	
BB																																			
24.0	a	24.2	24.3	24.4	24.5	24.6	24.7	24.8	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3													
	b	24.1	24.2	24.3	24.4	24.5	24.6	24.7	24.8	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2												
	c	23.4	23.5	23.7	23.8	24.0	24.1	24.3	24.4	24.6	24.7	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6	25.8	25.9	26.1	26.2	26.4													
24.5	a		24.7	24.8	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8												
	b		24.6	24.7	24.8	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.6	26.7												
	c		23.8	24.0	24.1	24.3	24.4	24.6	24.7	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6	25.8	25.9	26.1	26.2	26.4	26.5	26.7	26.8												
25.0	a			25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3											
	b			25.0	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1											
	c			24.3	24.4	24.6	24.7	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6	25.8	25.9	26.1	26.2	26.4	26.5	26.7	26.8	27.0	27.1	27.3											
25.5	a				25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8										
	b				25.5	25.6	25.7	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6										
	c				24.8	24.9	25.1	25.2	25.4	25.5	25.7	25.8	26.0	26.1	26.3	26.4	26.6	26.7	26.9	27.0	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8										
26.0	a					26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3									
	b					26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1									
	c					25.2	25.4	25.5	25.7	25.8	26.0	26.1	26.3	26.4	26.6	26.7	26.9	27.0	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2									
26.5	a						26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8								
	b						26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6								
	c						25.7	25.8	26.0	26.1	26.3	26.4	26.6	26.7	26.9	27.0	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7								
27.0	a							27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3							
	b							27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1							
	c							26.1	26.3	26.4	26.6	26.7	26.9	27.0	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1						
27.5	a								27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8						
	b								27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8			
	c								26.6	26.7	26.9	27.0	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7	28.8	29.0	29.1	29.3	29.4	29.6						
28.0	a									28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3					
	b									28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3			
	c									27.0	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7	28.8	29.0	29.1	29.3	29.4	29.6	29.7	29.9	30.0					
28.5	a										28.7	28.8	28.9	29.0	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8				
	b										28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6			
	c										27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7	28.8	29.0	29.1	29.3	29.4	29.6	29.7	29.9	30.0	30.2	30.3	30.5	30.6	30.8		
29.0	a											29.2	29.3	29.4	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3			
	b											29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2		
	c											27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7	28.8	29.0	29.1	29.3	29.4	29.6	29.7	29.9	30.0	30.2	30.3	30.5	30.6	30.8	30.9			
29.5	a												29.7	29.8	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8		
	b												29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.5	31.6		
	c												28.4	28.5	28.7	28.8	29.0	29.1	29.3	29.4	29.6	29.7	29.9	30.0	30.2	30.3	30.5	30.6	30.8	30.9	31.1	31.2	31.4		
30.0	a													30.2	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	
	b													28.8	29.0	29.1	29.3	2																	

BB	Ta	24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0	
24.0	a	24.4	24.6	24.7	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6	25.7	25.9	26.0	26.2	26.3	26.5	26.6	26.8	26.9	27.0	27.2	27.3													
	b	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3												
	c	25.2	25.3	25.4	25.5	25.6	25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8								
24.5	a		24.9	25.1	25.2	25.4	25.5	25.7	25.8	25.9	26.1	26.2	26.4	26.5	26.7	26.8	27.0	27.1	27.3	27.4	27.5	27.7	27.8												
	b		25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8											
	c		25.7	25.8	25.9	26.0	26.1	26.2	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	
25.0	a			25.4	25.6	25.7	25.9	26.0	26.2	26.3	26.4	26.6	26.7	26.9	27.0	27.2	27.3	27.5	27.6	27.7	27.9	28.0	28.2	28.3											
	b			26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	
	c			26.2	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	
25.5	a				25.9	26.1	26.2	26.4	26.5	26.6	26.8	26.9	27.1	27.2	27.4	27.5	27.7	27.8	28.0	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7	28.8										
	b				26.7	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.7	
	c				26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	
26.0	a					26.4	26.6	26.7	26.9	27.0	27.1	27.3	27.4	27.6	27.7	27.9	28.0	28.2	28.3	28.4	28.6	28.7	28.9	29.0	29.2	29.3	29.4								
	b					27.2	27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	
	c					27.3	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.2	
26.5	a						26.9	27.1	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7	28.8	28.9	29.1	29.2	29.4	29.5	29.7	29.8	29.9	30.0	30.2	30.3				
	b						27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.2	30.3			
	c						27.8	27.9	28.0	28.1	28.2	28.3	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	
27.0	a							27.4	27.6	27.7	27.8	28.0	28.1	28.3	28.4	28.6	28.7	28.9	29.0	29.1	29.3	29.4	29.6	29.7	29.9	30.0	30.2	30.3							
	b							28.2	28.3	28.4	28.4	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.2	30.3						
	c							28.3	28.5	28.6	28.7	28.8	28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	
27.5	a								27.9	28.0	28.2	28.3	28.5	28.6	28.8	28.9	29.1	29.2	29.4	29.5	29.6	29.8	29.9	30.1	30.2	30.4	30.5	30.7	30.8						
	b								28.7	28.8	28.9	28.9	29.0	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0			
	c								28.9	29.0	29.1	29.2	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0					
28.0	a									28.4	28.5	28.7	28.8	29.0	29.1	29.3	29.4	29.6	29.7	29.8	30.0	30.1	30.3	30.4	30.6	30.7	30.9	31.0	31.2	31.3					
	b									29.2	29.3	29.3	29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5		
	c									29.4	29.5	29.6	29.7	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	
28.5	a										28.9	29.0	29.2	29.3	29.5	29.6	29.8	29.9	30.1	30.2	30.3	30.5	30.6	30.8	30.9	31.1	31.2	31.4	31.5	31.6	31.8	31.9	32.0	32.1	
	b										29.7	29.8	29.8	29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	
	c										29.9	30.0	30.1	30.2	30.3	30.4	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	
29.0	a											29.4	29.5	29.7	29.8	30.0	30.1	30.3	30.4	30.5	30.7	30.8	31.0	31.1	31.3	31.4	31.6	31.7	31.9	32.0	32.1	32.3	32.4	32.5	
	b											30.2	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2		
	c											30.4	30.6	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	
29.5	a												29.9	30.0	30.2	30.3	30.5	30.6	30.8	30.9	31.0	31.2	31.3	31.5	31.6	31.8	31.9	32.1	32.2	32.3	32.5	32.6	32.8		
	b												30.7	30.7	30.8	30.9	31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6		
	c												31.0	31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	33.0		
30.0	a													30.4	30.5	30.7	30.8	31.0	31.1	31.2	31.4	31.5	31.7	31.8	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	
	b													31.1	31.2	31.3	31.4	31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	33.0		
	c													31.5	31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	33.0	33.1	33.2	33.3	33.4		
30.5	a														30.9	31.0	31.2	31.3	31.5	31.6	31.7	31.9	32.0	32.2	32.3	32.5	32.6	32.8	32.9	33.0	33.2	33.3	33.5	33.6	
	b														31.6	31.7	31.8	31.9	32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	33.0	33.1	33.2	33.3	33.4		
	c														32.0	32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	33.0	33.1	33.2	33.3	33.4	33.5	33.6	33.7	33.8		
31.0	a															31.4	31.5	31.7	31.8	31.9	32.1	32.2	32.4	32.5	32.7	32.8	33.0	33.1	33.3	33.4	33.5	33.7	33.8	34.0	
	b															32.1	32.2	32.3	32.4	32.5	32.6	32.7	32.8	32.9	33.0	33.1	33.2	33.3	33.4	33.5	33.6	33.7	33.8		
	c															32.5	32.7	32.8	32.9	33.0	33.1	33.2	33.3	33.4	33.5	33.6	33.7	33.8	33.9	34.0	34.1	34.2	34.3		
31.5	a																31.9	32.0	32.2	32.3	32.4	32.6	32.7	32.9	33.0	33.2	33.3	33.5	33.6	33.7	33.9	34.0	34.2	34.3	
	b																32.6	32.7	32.																