



Campagne de comparaison de la validité respective des principaux indices de contraintes thermiques.

J.P. Meyer, R. Rapp, J.J. Vogt

► To cite this version:

J.P. Meyer, R. Rapp, J.J. Vogt. Campagne de comparaison de la validité respective des principaux indices de contraintes thermiques.. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 156, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 1997, 88 p., ill., bibliogr. hal-01420143

HAL Id: hal-01420143

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420143>

Submitted on 20 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

JUIN 1997

N° ISSN 0397 - 4529

156

CAMPAGNE DE COMPARAISON DE LA VALIDITE RESPECTIVE DES PRINCIPAUX INDICES DE CONTRAINTES THERMIQUES

J.P. MEYER, R. RAPP, J.J. VOGT

Etude réalisée dans le cadre d'un contrat de la
Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier
(CECA n° 7247-22-006)

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE

**SIEGE SOCIAL :
30, RUE OLIVIER-NOYER, 75680 PARIS CEDEX 14**

**CENTRE DE RECHERCHE :
AVENUE DE BOURGOGNE, 54501 VANDŒUVRE CEDEX**

SOMMAIRE

RESUME

1 - INTRODUCTION	1
1.1 - Généralités	1
1.2 - Historique	1
1.3 - But de l'étude	1
2 - METHODOLOGIE	2
2.1 - Généralités	2
2.2 - Choix des postes de travail	2
2.2.1 - Pré-étude	2
2.2.2 - Etude proprement dite	3
2.3 - Mesures réalisées	4
2.3.1 - Grandeurs physiques	4
2.3.1.1 - Généralités	4
2.3.1.2 - Matériel lourd	4
2.3.1.3 - Matériel léger	6
2.3.1.4 - Calcul des valeurs des grandeurs physiques caractéristiques de la contrainte thermique dans une zone	6
2.3.2 - Grandeurs physiologiques	7
2.3.2.1 - Généralités	7
2.3.2.2 - Fréquence cardiaque	7
2.3.2.3 - Métabolisme énergétique	7
2.3.2.4 - Température corporelle	8
2.3.2.5 - Pertes évaporatoires	8
2.4 - Méthodes de calcul	8
2.5 - Présentation des résultats des différents indices	9
2.6 - Calcul des durées limites d'exposition (DLE)	10
2.7 - Durée de la période d'observation	10
3 - RESULTATS	11
3.1 - Plages de contraintes et d'astreintes étudiées	11
3.1.1 - Paramètres physiques	11
3.1.2 - Grandeurs physiologiques	12
3.2 - Corrélations entre les indices calculées et l'astreinte sudorale mesurée	14
3.3 - Relations entre les différents indices calculés	20
3.4 - Détermination des durées limites d'exposition (DLE)	20
3.5 - Temps de mesure nécessaire à une bonne estimation de l'astreinte sudorale	22

4 - DISCUSSION	23
4.1 - Choix du meilleur indice	23
4.2 - Intérêt pratique de l'indice Sudation Requisite	24
4.3 - Amélioration de l'indice Sudation Requisite	25
5 - CONCLUSION	26
6 - BIBLIOGRAPHIE	27

ANNEXE I

1 - POSTES ETUDIES	31
1.1 - Poste d'égaliseur	31
1.2 - Poste de laveur	31
1.3 - Poste de boulanger	32
1.4 - Poste de couleur de produits réfractaires	32
1.5 - Poste de couleur cuvette	33
1.6 - Poste de machiniste	33
1.7 - Poste de lamineur	34
1.8 - Poste de trempoir	34
1.9 - Poste de soudeur	35
1.10 - Poste de tapper tunnel	35
1.11 - Situation expérimentale en cellule chaude	36
1.12 - Poste de mineur	36

ANNEXE II

1 - RESULTATS PAR POSTE	
1.1 - Présentation des résultats	39
1.1.1 - Contrainte thermique	39
1.1.2 - Astreinte thermique	39
1.1.3 - Evolution de la contrainte thermique	39
1.1.4 - Tableau comparatif des contraintes calculées à l'astreinte sudorale mesurée	40
1.1.5 - Commentaire	40
1.2 - Résultats par poste	41
1.2.1 - Poste d'égaliseur	41
1.2.2 - Poste de laveur	45
1.2.3 - Poste de boulanger	49
1.2.4 - Poste de couleur de produits réfractaires	53
1.2.5 - Poste de couleur cuvette	57
1.2.6 - Poste de machiniste	61
1.2.7 - Poste de lamineur	65
1.2.8 - Poste de trempoir	69
1.2.9 - Poste de soudeur	73
1.2.10 - Poste de tapper tunnel	77
1.2.11 - Poste expérimental cellule chaude	81
1.2.12 - Poste de mineur	85

R E S U M E

Le choix d'un indice de contrainte thermique est délicat, ceci est dû en particulier à l'existence d'un grand nombre d'indices et à l'absence d'études qui aient tenté une comparaison de la validité des indices les plus importants en situation réelle de travail. La CECA a introduit, dans sa 5ème campagne d'études ergonomiques le thème de la "Validation des indices de contraintes thermiques". L'opportunité de cette étude était renforcée par l'inscription au programme de travail de l'ISO de l'élaboration d'une norme prenant pour base l'indice Sudation requise (Sreq).

Neuf indices ont été retenus pour la présente étude comparative : Effective Temperature (ET), Effective Temperature star (ET*), Heat Stress Index (HSI), Index of Thermal Stress (ITS), Predicted Mean Vote (PMV), Predicted 4 Hour Sweat Rate (P4SR), Sreq, Température équivalente (Teq) et Wet Bulb and Globe Temperature (WBGT).

La validation a consisté à comparer les valeurs calculées des 9 indices à l'astreinte mesurée constituée par la perte de poids résultante de l'évaporation sudorale, durant les mêmes phases d'exposition.

L'étude a été réalisée dans onze situations de travail industriel et un poste à fort rayonnement simulé en laboratoire. A chaque poste, cinq salariés en bonne santé ont été volontaires pour participer à l'étude.

Les cinq paramètres physiques suivants de la contrainte thermique ont été mesurés conformément aux prescriptions de la norme ISO/DIS 7726 : la température de globe noire (tg), la température sèche de l'air (ta), la température humide de l'air (th), la vitesse de l'air (Va), la température humide naturelle (thn).

Quatre grandeurs physiologiques ont été mesurées : la fréquence cardiaque (FC) a été enregistrée en continu ; la température sublingale (Tbu), représentative de la température centrale, a été mesurée toutes les heures ; les pertes évaporatoires ont été calculées à partir de pesées répétées des salariés et de leurs ingestats et excréments. Le métabolisme énergétique a été calculé à partir de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) mesurée à l'aide d'un appareil portable (Oxycon P). Les méthodes de calcul des différents indices ont été définies par un groupe d'experts de la CECA constitué dans le cadre de cette campagne.

Les résultats montrent que dans les conditions thermiques de cette étude, l'indice Sreq est, des neuf indices retenus, celui qui permet la meilleure prévision de l'astreinte thermique. Cependant, le fait que cet indice est précis a pour corollaire sa complexité de mise en oeuvre en situation industrielle du fait du nombre élevé de paramètres à mesurer et de la variabilité des contraintes thermiques au poste de travail. Ainsi, une démarche plus simple d'estimation de la contrainte thermique peut être d'employer l'indice WBGT. Dans toutes les conditions thermiques où cet indice ne dépasse pas 25°C la contrainte n'est pas excessive. Si le WBGT dépasse 25°C, il faut utiliser l'indice Sreq qui permet une prévision plus précise dans ces situations qui présentent, pour le salarié exposé, un risque d'astreinte thermique excessive.

Les mesures physiologiques FC et Tbu réalisées au cours de la présente étude ont démontré, même en situation de terrain, leur intérêt grâce à leur facilité d'emploi et à la fiabilité de la mesure de l'astreinte qu'elles permettent d'obtenir. L'approche physiologique de l'astreinte est donc à utiliser autant que possible.

L'un des intérêts de l'indice Sreq est de permettre de prévoir une durée limite d'exposition (DLE). Or, dans trois des quatre situations où l'astreinte thermique mesurée est excessive, les DLE calculées sont trop longues et amènent à exposer les salariés à des situations dangereuses car les valeurs limites des indicateurs physiologiques d'astreinte sont dépassées. Ainsi, lorsque l'astreinte thermique est excessive, l'approche physiologique présente plus de sécurité que l'indice Sreq.

1 - INTRODUCTION

1.1 - Généralités

Malgré l'évolution du tissu industriel qui a eu pour conséquence d'améliorer les conditions de travail, des situations de travail à contrainte thermique chaude existent toujours comme le prouve l'enquête du Ministère du Travail (1985). D'autre part, la modernisation et l'automatisation ont permis d'écarter l'homme des contraintes extrêmes de toutes natures et donc thermiques ; cependant elles n'ont pas complètement supprimé son exposition lors de séquences, plus brèves, dues à des défaillances des systèmes de production. Ces interventions sont souvent réalisées à "chaud" et leur durée ne peut être déterminée à l'avance. Au-delà de ces situations extrêmes l'aspiration de l'homme à travailler en situation de confort est légitime. Ces exigences imposent qu'une analyse précise et reconnue des astreintes soit possible.

1.2 - Historique

Le premier thermomètre a été fabriqué par des verriers florentins au 17ème siècle. Le thermomètre ne permet de prendre en compte que la température de l'air. La première tentative d'intégrer dans une même valeur plusieurs paramètres de l'ambiance thermique est l'oeuvre de HALDANE en 1905 (cité par LEE, 1980) qui a utilisé, dans les travaux miniers au Pays de Galles, l'indice "température humide". L'évolution des indices d'évaluation de la contrainte thermique s'est poursuivie par l'élaboration d'indices empiriques, sur des bases psychophysiques, comme l'indice "Effective Temperature" (YAGLOU, 1927), sur la mise au point de diagrammes extrapolés de résultats expérimentaux comme le P4SR (predicted 4 hour sweat rate) (Mc ARDLE et coll., 1947) ou sur des équations établies de façon quasi intuitive comme le WBGT (wet bulb and globe temperature) (YAGLOU et MINARD, 1957). L'indice PMV-PPD (predicted mean vote - predicted percent of dissatisfied) de FANGER (1972) a été mis au point par la méthode psychophysique puis modélisé. Des études, fort nombreuses, ont permis de mieux connaître les réactions de l'homme exposé à la chaleur (GAGGE et coll. 1937 ; NELSON et coll., 1947 ; WYNDHAM et coll., 1953 ; SALTIN et HERMANSEN, 1966). Les résultats de ces travaux ont permis de définir des limites physiologiques d'exposition à la chaleur, basées sur une valeur limite de température cutanée moyenne (IAMPIETRO, 1971 ; VAIDA et coll., 1971 ; SHVARTZ et BENOR, 1972), sur des limites d'élévation de la température corporelle (WYNDHAM et coll., 1965 ; BELDING, 1970 ; GIVONI et GOLDMANN, 1972) ou sur l'augmentation de la fréquence cardiaque de repos (VOGT et coll., 1970 ; DAYAL et RAMSEY, 1977 ; FULLER et SMITH, 1981). L'évaporation de la sudation, qui est le plus important moyen de thermolyse pour l'homme exposé à la chaleur, est l'un des éléments de l'astreinte thermique le plus intéressant à retenir (HATCH, 1963 ; BENZINGER, 1969 ; KERSLAKE, 1972). La prédiction de la sudation nécessaire au maintien de l'homéothermie est à la base de tous les indices analytiques d'estimation de l'astreinte thermique (BELDING et HATCH, 1955 ; GIVONI, 1963 ; VOGT et coll. 1981 ; SHAPIRO et coll., 1982).

1.3 - But de l'étude

Du fait du grand nombre d'indices de contrainte ou d'astreinte existant, la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier (CECA) a introduit, dans sa 5ème campagne d'études ergonomiques, le thème : "Validation des indices de contraintes thermiques". Un groupe d'experts s'est constitué sous la présidence du Pr METZ (STRASBOURG). Trois axes de travail ont été définis :

- validation en milieu industriel de neuf indices de contrainte/astreinte thermique,
- effets du vêtement sur les échanges thermiques évaporatoires,
- influence du métabolisme énergétique sur la contrainte thermique.

La validité des indices de contrainte en milieu industriel a été étudiée par quatre laboratoires :

- Institut d'Hygiène des Mines, à Hasselt, Belgique, (M. C. VANWONTERGHEM),
- Université de Wupperthal, Institut de Sécurité et d'Hygiène à Wupperthal, Allemagne, (Pr T. HETTINGER),

- Université Catholique de Louvain, Unité d'Hygiène et de Physiologie du Travail à Bruxelles, Belgique, (Pr J. MALCHAIRE),
- Institut National de Recherche et de Sécurité (I.N.R.S.) à Nancy, France, (Dr J.J. VOGT).

Le deuxième axe a été étudié au Laboratoire de Psychologie et de Physiologie Environnementale du CNRS, à Strasbourg, France, (Responsable Dr V. CANDAS). Le troisième thème a été étudié par l'Institut de Médecine du Travail du National Coal Board à Burton-on-Trend, Angleterre, (Responsable M. L.A. MORRIS).

Le présent rapport ne concerne que les résultats relatifs à la validation en milieu industriel de différents indices de contraintes thermiques. Face à la multiplicité des méthodes de calcul de la charge thermique au poste de travail la première tâche du groupe d'experts a été de choisir les indices à étudier sur la base de 3 critères :

- la possibilité d'utilisation en milieu réel,
- la validité intrinsèque de l'indice,
- l'importance de son utilisation à l'heure actuelle.

Neuf indices ont ainsi été retenus :

- ET (effective temperature ; YAGLOU, 1927),
- Et* (effective temperature star ; GAGGE et coll., 1971),
- HSI (heat stress index ; BELDING et HATCH, 1955),
- ITS (index of thermal stress ; GIVONI, 1963),
- PMV (predicted mean vote) et PPD (predicted percent of dissatisfied ; FANGER, 1972),
- P4SR (predicted 4 hour sweat rate ; Mc ARDLE et coll., 1947),
- SReq ou SWreq (Sudation Requise ; VOGT et coll., 1981),
- Teq (température équivalente ; MALCHAIRE, 1979),
- WBGT (wet bulb and globe temperature ; YAGLOU et MINARD, 1957).

Ces indices peuvent être rassemblés en deux groupes selon leur nature :

- empirique : ET, P4SR et WBGT,
- analytique : ET*, HSI, ITS, PMV, SReq et Teq.

La validité de chaque indice a été évaluée grâce à la plus ou moins bonne correspondance qui existait entre la contrainte calculée par l'indice et la sudation mesurée.

2 - METHODOLOGIE

2.1 - Généralités

La présente étude a été réalisée en deux phases :

- une pré-étude dont le but était d'analyser la contrainte thermique dans trente à quarante situations de travail à la chaleur très variées quant aux types de tâches et aux paramètres de l'ambiance thermique,
- l'étude proprement dite sur 12 postes de travail sélectionnés parmi les postes étudiés lors de la première phase, en fonction de critères de type de travail physique et des paramètres de l'ambiance thermique afin de tester les indices dans des situations aussi variées que possible.

2.2 - Choix des postes de travail

2.2.1 - Pré-étude

La pré-étude a été réalisée sur 36 postes de travail répartis dans 16 entreprises différentes et ne portait que sur un salarié par poste. La durée de l'observation était comprise entre 2 et 4 heures. Les grandeurs mesurées étaient :

- physiques : température de globe noir, température humide naturelle,
- physiologiques : variation de la température buccale, estimation du métabolisme énergétique par analyse de l'activité au poste de travail et calcul du métabolisme énergétique d'après les tables de SPITZER et HETTINGER (1965), enfin une appréciation subjective de l'astreinte thermique était demandée au salarié dont le poste était observé.

2.2.2 - Etude proprement dite

Le groupe d'experts a retenu quatre critères pour l'étude :

- cinq salariés par poste,
- analyse pendant 4 heures de l'exposition de chaque salarié,
- salariés habituellement occupés à ce poste,
- activité du poste peu variable d'un salarié à l'autre.

Ainsi des 36 postes examinés au cours de la pré-étude, douze ont été retenus pour y réaliser l'étude proprement dite sur les critères suivants :

- les types de contrainte ; l'échantillon des postes retenus devait comprendre un nombre approximativement égal de situations humides et de températures élevées de rayonnement (contrainte radiante) et d'air (contrainte convective) ;
- l'intensité des contraintes qui devait couvrir une plage allant d'ambiance à charge thermique modérée jusqu'à des situations à très forte contrainte.

Des difficultés matérielles n'ont pas permis le dépouillement des résultats à deux postes en sidérurgie. De ce fait une étude en chambre chaude, appelée "situation expérimentale", a été menée à l'INRS afin de simuler une situation de travail à forte contrainte radiante. Enfin un poste de mineur a été intégré à l'étude suite à la proposition du médecin du travail et des services de sécurité des mines, ce poste n'a pas fait l'objet d'une pré-étude. En définitive les douze postes de travail qui ont été retenus pour cette étude sont :

- A. Egaliseur (Fromagerie industrielle)
- B. Laveur (Fromagerie industrielle)
- C. Boulanger (Boulangerie industrielle)
- D. Couleur de produits réfractaires
- E. Couleur de cuvettes
- F. Machiniste (machine IS en verrerie)
- G. Lamineur
- H. Trempeur
- I. Soudeur (fond de générateur de vapeur)
- J. Tappeur tunnel (décochage en fonderie)
- K. Situation expérimentale
- L. Mineur (mines de potasse)

Un descriptif détaillé de tous les postes étudiés est présenté dans l'annexe I. Tous les salariés étaient volontaires pour participer à l'étude et ont été examinés par le médecin du travail de leurs entreprises respectives. Les moyennes des caractéristiques anthropométriques des 60 salariés étudiés sont présentées ci-dessous.

Caractère	Moyenne	Ecart-type
Age (années)	32,1	8,1
Taille (cm)	172,7	6,9
Poids (kg)	71,7	9,9
Surface corporelle (m ²)	1,86	0,14

2.3 - Mesures réalisées

Les méthodes de mesures des grandeurs physiques et physiologiques qui caractérisent la contrainte et l'astreinte thermiques sont présentées successivement.

2.3.1 - Grandeurs physiques

2.3.1.1 - Généralités

L'étude de terrain impose d'effectuer des mesures en gênant le moins possible le déroulement normal du travail. Les déplacements du salarié et, de ce fait, les modifications des ambiances dans lesquelles il se trouve, ont nécessité un découpage en zones de l'espace géographique où évolue le salarié. Dans chaque zone définie, les 4 grandeurs physiques (t_a , t_r , t_h et V_a) étaient homogènes. Une nouvelle zone était définie si l'une de ces grandeurs était modifiée. La cartographie thermique était définie en début de poste, mais en fonction des résultats des mesures, elle pouvait être modifiée durant l'observation. Ceci a permis de tenir compte de l'évolution dans le temps, au cours des périodes de mesures de 4 heures, des grandeurs physiques de l'ambiance. Le temps de séjour du salarié dans chaque zone était mesuré. Ainsi, connaissant la durée de séjour et la zone correspondante, il était possible de calculer la contrainte thermique à laquelle le salarié était exposé. Cinq grandeurs physiques, nécessaires au calcul d'autres grandeurs caractéristiques de l'environnement thermique, étaient mesurées dans chaque zone :

- la température de globe noir (t_g)
- la température de l'air (t_a)
- la température humide de l'air (t_h)
- la vitesse de l'air (V_a)
- la température humide naturelle (t_{hn}).

Toutes ces grandeurs ont été mesurées, dans chaque zone, à trois hauteurs différentes : 0,1 ; 1,1 et 1,7 mètre pour un homme debout (AFNOR X35-201).

Deux types de matériel ont été utilisés :

- l'un dit "lourd" a été employé le plus souvent. Il comprend essentiellement les différentes sondes thermiques et les anémomètres reliés à un système d'acquisition piloté par un microcalculateur HP 85,
- l'autre, "léger", remplace le précédent dans certaines situations où il était interdit d'employer un matériel à alimentation électrique ou impossible de mettre en place les supports de sondes.

2.3.1.2 - Matériel lourd

La disposition spatiale de ce matériel en un point représentatif de l'ambiance d'une zone (cf. 2.3.1.1) est présentée à la figure 1.

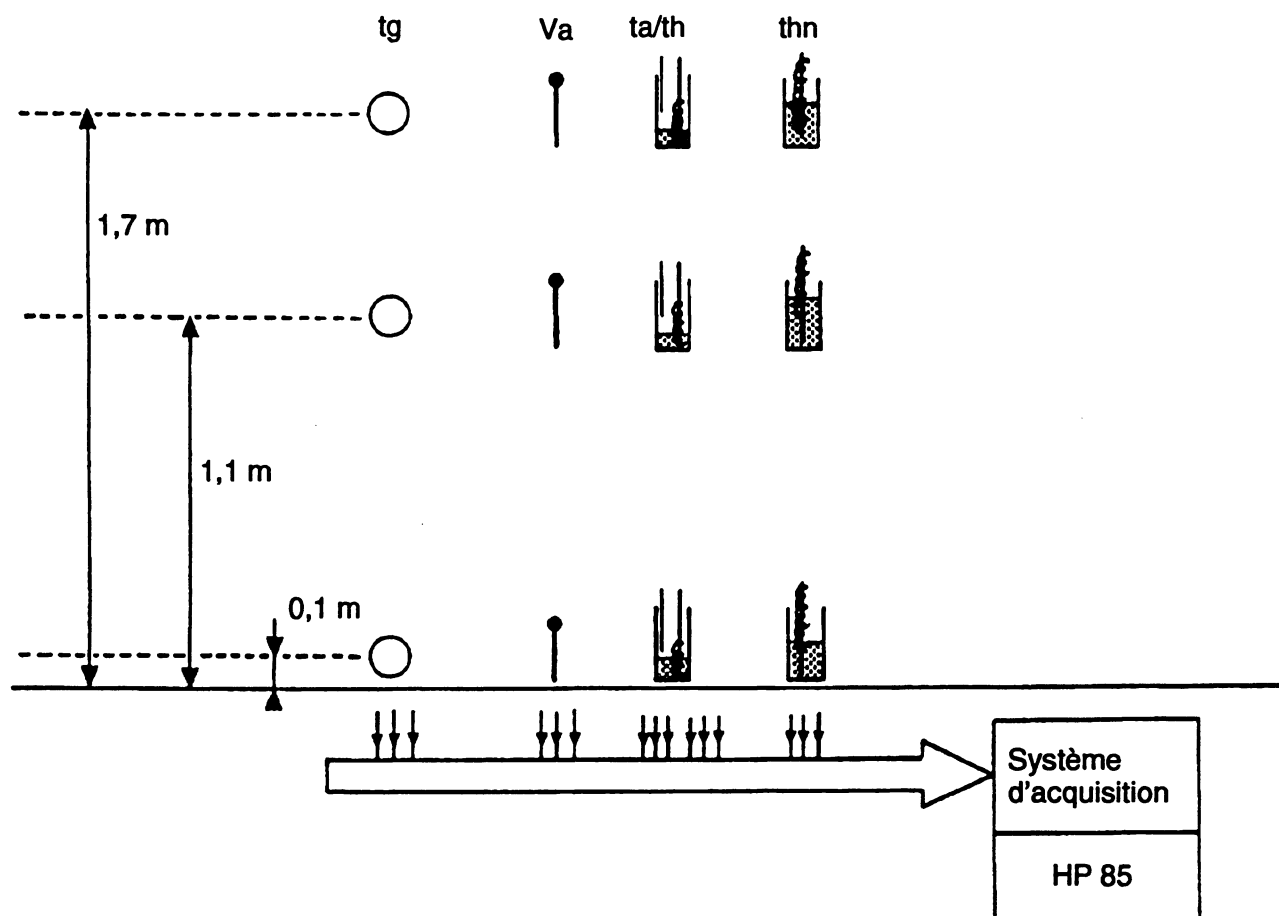


Figure 1 : Disposition spatiale des différents capteurs et moyens d'enregistrement des températures de globe (tg), d'air sec (ta), humide (th), de la température humide naturelle (thn) et de la vitesse d'air (Va).

Les différents éléments du système de mesure étaient :

- Plusieurs supports de globes noirs qui permettaient la mise en place des globes pendant au moins 30 minutes, avant la mesure pour obtenir une température stabilisée. Trois globes noirs de 15 cm de diamètre étaient fixés aux trois hauteurs définies précédemment sur chaque support. La partie sensible du globe était une sonde platine 100 ohms à 0°C dont la précision est supérieure à 0,5°C.
- Un support de sondes pour la mesure à 3 niveaux de :
 - la température de l'air,
 - la température humide,
 - la vitesse de l'air,
 - la température humide naturelle.

Ce support était placé à proximité immédiate du support des globes noirs juste avant le début de l'acquisition des grandeurs climatiques au point considéré. Les capteurs de vitesse d'air étaient des sondes omnidirectionnelles TSI modèle 1620. La précision des sondes est de 10 % de la vitesse lue pour des V_a comprises entre 0,2 et 3 m.s⁻¹. Un fumigène permettait de repérer le sens de l'écoulement de l'air afin de positionner correctement chaque sonde.

Les capteurs de températures étaient des sondes TECORA. Les sondes de température humide naturelle ont été modifiées de façon à être conformes à la norme AFNOR (X 35-201). L'élément sensible de ces capteurs est une sonde platine 100 ohms à 0°C dont la précision est supérieure à 0,5°C.

- Un système d'acquisition piloté par microcalculateur HP85. Le système d'acquisition permet la mesure de la résistance des sondes platines (grâce à un montage à 4 fils) et de la tension électrique de sortie des anémomètres. A chaque point, l'acquisition des mesures et leur traitement duraient environ 20 minutes. Chaque température était relevée une fois toutes les minutes (20 mesures par sonde soit 240 relevés au total). Les vitesses d'air étaient relevées toutes les 3 secondes à chaque sonde (400 relevés par sonde soit 1200 au total par point de mesure). A la fin de chaque étude de poste un prétraitement des données permettait de convertir les résistances en températures et les tensions en vitesse d'air et, pour chaque hauteur, de calculer la valeur moyenne des 5 paramètres considérés. Ces valeurs étaient stockées sur mémoire magnétique.

2.3.1.3 - Matériel léger

Ce matériel permet de mesurer :

- la température de globe noir avec le dispositif décrit précédemment mais le capteur sensible était un thermomètre à mercure (plage de lecture 0-65°C ; précision de la lecture : 0,5 °C).
- la température sèche de l'air et la température humide à l'aide d'un psychromètre (ULTRAKUST-44550) fonctionnant dans la plage de températures de -30 à 100°C avec une précision de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Un psychromètre mécanique à aspiration (WIHL-LAMBRECHT) a également été utilisé au poste de mineur, sa précision est d'environ 0,5°C.
- la température humide naturelle soit par une sonde YSI modèle 93 (précision 0,5°C) soit à l'aide d'un thermomètre à mercure de type ASPIN (PROLABO). La partie sensible du thermomètre était recouverte d'un coton humidifié qui trempait dans un réservoir accolé au thermomètre. La précision est de 0,5°C.
- Deux appareils ont été utilisés pour la mesure de la vitesse de l'air :
 - un anémomètre à fil chaud (1650 de TSI) dont la précision est de $\pm 0,06 \text{ m.s}^{-1}$ pour des V_a inférieures à 3 m.s^{-1} ,
 - un anémomètre à ailettes (1405 de WIHL-LAMBRECHT) qui intègre la mesure sur une minute. L'erreur maximale, donnée par le fabricant, est de $\pm 2 \%$ à la valeur maximale de mesure de 20 m.s^{-1} .

Ces appareils sont directionnels, les mesures étaient donc réalisées dans les trois directions de l'espace (ISO/DIS 7726).

2.3.1.4 - Calcul des valeurs des grandeurs physiques caractéristiques de la contrainte thermique dans une zone

La température moyenne de rayonnement ($\bar{t}_r$) et la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (PaH_2O) étaient calculées à chaque point pour chaque hauteur à partir des valeurs moyennées temporellement lorsque le matériel lourd était utilisé. Lorsque le matériel léger était utilisé le calcul se faisait à partir des relevés ponctuels des variables de l'ambiance. Enfin, la valeur représentative d'un point de mesure et pour toutes les grandeurs physiques était la moyenne pondérée des valeurs mesurées aux trois hauteurs. Les pondérations respectives des hauteurs 0,1 ; 1,1 et 1,7 mètre (pour un sujet debout) sont 0,25 ; 0,5 et 0,25 (ISO/DIS 7726).

La valeur retenue pour chaque point est donnée par la formule :

$$T = [T_{(0,1)} + 2T_{(1,1)} + T_{(1,7)}] / 4$$

où T = valeur moyenne
 $T(x)$ = valeur de la grandeur mesurée à la hauteur x

2.3.2 - *Grandeurs physiologiques*

2.3.2.1 - *Généralités*

Les mesures physiologiques nécessaires au calcul du bilan thermique sont :

- La production de chaleur endogène qui est égale au métabolisme énergétique car le rendement physique du travail musculaire est très faible et peut-être négligé dans les tâches analysées (VOGT et METZ, 1981).
- Le stockage de chaleur, évalué au moyen des variations de températures corporelles. La température témoin retenue est la température sublinguale (STRYDOM et coll., 1965 ; MAIRIAUX et coll., 1983).
- Les pertes de chaleur par évaporation de la sueur, sont évaluées au moyen des pertes de poids corporel au cours de l'exposition.

2.3.2.2 - *Fréquence cardiaque*

La fréquence cardiaque (FC) était obtenue par comptage électronique des ondes R d'un ECG recueilli par électrodes précordiales et transmis par télémetrie (HELLIGE SERVOMED) et enregistré sur bande magnétique.

2.3.2.3 - *Métabolisme énergétique*

La mesure de $\dot{V}O_2$ a été effectuée grâce à un appareil portable (OXYCON P, MIJNHARDT). Celui-ci comporte un embout buccal prolongé d'une valve à trois voies, un pince-nez et un boîtier de mesure, porté dans le dos et raccordé à la valve par un tuyau souple qui collecte l'air expiré. Le poids de l'ensemble est d'environ 3,5 kg. Ce dispositif mesure le volume expiré en litres par minute, la concentration d'oxygène et la température de l'air expiré. L'appareil est relié par câble à une partie fixe qui affiche, minute par minute, les valeurs de $\dot{V}O_2$ ramenées aux conditions STPD. D'après les caractéristiques fournies par le fabricant, le quotient respiratoire est arbitrairement fixé à 1, la précision de la mesure est de 2 % et le temps de réponse de l'appareil est inférieur à 20 secondes.

La durée des mesures était variable et dépendait de l'activité et de la bonne volonté des salariés ; elle s'échelonnait de 8 à 20 minutes par séquence. Durant les 4 heures d'observation, 2 à 4 séquences de mesures étaient réalisées. Le calcul du métabolisme énergétique sur l'ensemble de la durée de mesure était réalisé grâce à la relation $\dot{V}O_2 = f(FC)$ établie à partir des résultats de $\dot{V}O_2$ et FC obtenus au cours des séquences de mesure au travail. Puis à partir des valeurs de FC, enregistrées en continu, et introduites dans la relation précédente une $\dot{V}O_2$ était calculée pour chaque minute de travail (NIELSEN et MEYER, 1987). La consommation d'oxygène était transformée en dépense énergétique en utilisant un équivalent énergétique de 20,3 kJ par litre d'oxygène consommé.

Dans deux situations de travail cette méthode de mesure de $\dot{V}O_2$ n'a pas été utilisée :

- La situation expérimentale en chambre chaude où la méthode des sacs de DOUGLAS a été utilisée. Les concentrations de CO_2 et d' O_2 dans l'air expiré ont été mesurées par les appareils BECKMANN LB2 et OM11 respectivement.

- Le poste de mineur où seul le volume ventilé ($\dot{V}_e$) a été mesuré avec un respiromètre de MULLER. Pour chaque mineur, la $\dot{V}O_2$ au poste de travail est déterminée à partir de la relation $\dot{V}O_2 = f(\dot{V}_e)$ établie préalablement sur bicyclette ergométrique. Le $\dot{V}_e$ a été corrigé pour tenir compte de la pression barométrique au fond de la mine.

2.3.2.4 - Température corporelle

Une thermistance (CRAFTON) placée sous la langue du salarié mesurait la température sublingale. Celui-ci gardait la bouche fermée jusqu'à la lecture de la température, 6 à 8 minutes après la mise en place du capteur. La température buccale était mesurée avant et après la période d'observation de 4 heures et durant le travail au moment des pauses. La précision des capteurs est donnée à 0,1°C par le fabricant.

2.3.2.5 - Pertes évaporatoires

Les salariés étaient pesés au moyen d'une balance romaine (TESTUT) qui pèse à 10 grammes près, en début et en fin de période de 4 heures et durant le travail environ toutes les 1/2 heures. Cette fréquence n'était cependant pas toujours respectée du fait de l'organisation du travail qui ne permettait pas toujours des interruptions régulières. Afin de tenir compte des excréments, les salariés ont été pesés avant et après avoir été aux toilettes. La perte évaporatoire a été calculée à partir de la perte de poids et du poids des ingestats pesés sur une balance de cuisine (précision +/- 5 gr). La figure 2 présente la chronologie des mesures physiologiques réalisées à un poste de travail.

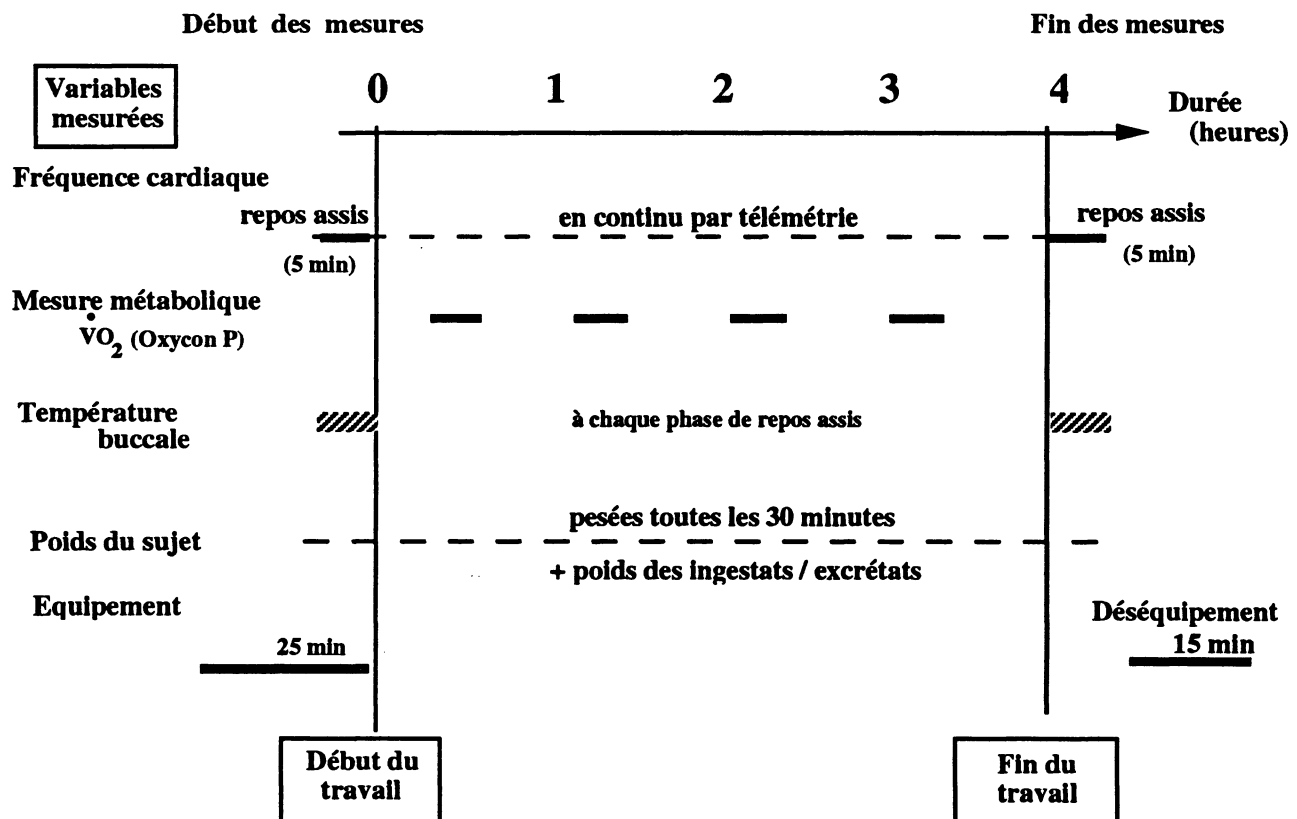


Figure 2 : Chronologie des mesures physiologiques durant les 4 heures d'observation d'un salarié

2.4 - Méthodes de calcul

Les méthodes de calcul des différents indices de contraintes thermiques ont été définies lors des réunions du groupe de travail de la CECA (MALCHAIRE, 1984). Pour tous les indices, deux méthodes de calcul ont été utilisées à savoir :

- une méthode classique qui permet de calculer pour chaque séquence d'exposition la valeur de l'indice et cumule ces valeurs pour obtenir l'indice sur toute la durée de l'exposition. Cette méthode est notée ISO pour l'indice Sudation Requise et séq/séq pour les autres indices ;
- une méthode de calcul exponentiel qui permet, pour le calcul de l'indice, à l'instant t, de prendre en compte en plus de la contrainte de l'instant t les conditions d'exposition des 10 minutes précédentes. Cette méthode a été appliquée aux grandeurs physiques de base et au métabolisme énergétique. Cette méthode est notée expo.

La valeur d'une quelconque des grandeurs de base à l'instant t est donnée par la formule :

$$P(t) = P_m(t) \times (1 - e^{-1/t}) + P(t-1) \times e^{-1/t}$$

où : $P(t)$ est la valeur du paramètre pris en compte dans le calcul des indices à l'instant t,
 $P_m(t)$ est la valeur du paramètre mesuré à l'instant t,
 $P(t-1)$ est la valeur du paramètre à l'instant (t-1),
t est exprimé en seconde donc $t = 600$ (10 minutes).

Pour le calcul de l'indice Sudation Requise par la méthode exponentielle (expo) deux méthodes de calcul ont été utilisées :

- l'une prend pour valeurs de température cutanée moyenne ($\bar{T}_{sk}$) et de rendement évaporatoire de la sudation (η), les valeurs indiquées par les normes ISO (ISO/DIS 7933) et AFNOR (X35-204). Cette méthode est notée ISOexpo dans ce rapport,
- l'autre utilise des valeurs de $\bar{T}_{sk}$ et de rendement évaporatoire de la sudation (η) d'après les formules proposées par le Pr HETTINGER :

a) $\bar{T}_{sk} = 30.64 + 0,1 t_a + 0,46 V_a + 0,47 I_{cl} - 0,0084 M$

où : t_a est exprimé en °C et V_a en $m s^{-1}$
 I_{cl} est l'isolement du vêtement en Clo
 M est le métabolisme en $W.m^{-2}$

b) $\eta = 1 - 0,5 \omega^2$

où : η est le rendement évaporatoire de la sudation
 ω est la mouillure cutanée
Ces deux grandeurs sont sans dimension.

Cette méthode est notée ISOmod dans le présent rapport.

2.5 - Présentation des résultats des différents indices

Les résultats des différents indices sont exprimés sous deux formes : d'une part dans leurs unités d'origines (°C, pertes sudorales ou en unités arbitraires) et d'autre part, en % pour permettre une comparaison simple de tous les indices entre eux. La valeur en % est calculée par interpolation linéaire entre les valeurs 0 % (situations de confort calculées à partir des valeurs de confort proposées par FANGER (1972)) et 100 % (valeur limite d'exposition recommandée pour chaque indice). Pour les indices qui permettent le calcul d'une sudation la valeur de 100 % correspond à un débit de 750 g de sueur par heure.

Pour les différents indices les valeurs de confort calculées (0 %) et les limites d'exposition recommandées (100 %) sont présentées dans le tableau 1.

INDICE	VALEUR DE CONFORT (0 %)	LIMITE SUPERIEURE (100 %)
ET	28,8 - 0,091 . M (°C)	34,2 - 0 02 . M (°C)
ET*	33,1 - 0,108 . M (°C)	42 (°C)
HSI	0 %	100 %
ITS	0 gr	750 gr.h ⁻¹
PPD	0 %	100 %
P4SR	0 gr	3 l en 4 h
SReq	0 gr	750 gr.h ⁻¹
Teq	29,6 - 0,064 . M (°C)	35,2 - 0,053 . M (°C)
WBGT	27,2 - 0,095 . M (°C)	35,5 - 0,039 . M (°C)

Tableau 1 : Valeurs limites de confort et de contrainte acceptables pour les 9 indices de contrainte thermique. M est le métabolisme énergétique exprimé en Watt par mètre carré de surface corporelle.

2.6 - Calcul des durées limites d'exposition (DLE)

L'un des intérêts de l'indice Sudation Requise est de proposer une limite du temps d'exposition des salariés lorsqu'ils interviennent dans des ambiances thermiques qui ne permettent pas le maintien de l'homéothermie. La DLE obtenue à partir de l'indice Sudation Requise est comparée aux DLE obtenues à partir de grandeurs physiologiques. L'évolution de la température buccale, de la fréquence cardiaque de repos et de la sudation mesurée permettent de calculer 3 DLE basées sur des critères physiologiques. Les limites retenues pour les élévations de température buccale (DLE_{tbu}), de fréquence cardiaque (DLE_{FC}) et de pertes sudorales (DLE_{sud}) sont respectivement de 1°C (ISO/DIS 7933), de 30 batt.min⁻¹ (KAMON et BELDING, 1971 ; KAMON, 1972), et 750 g.h⁻¹ ou de 5 litres par poste de 8 heures (ISO/DIS 7933).

De plus une estimation subjective de la durée possible d'exposition (DLE_{sub}) était demandée aux salariés à chaque changement d'ambiance lorsque les durées d'exposition, à des situations thermiques stables, étaient assez longues. Dans aucune situation rencontrée au cours de cette étude, le salarié n'a présenté d'astreinte excessive qui imposa une DLE inférieure à la durée effective d'exposition. De ce fait, les résultats de DLE ont été obtenus par extrapolation des relations entre les variations des grandeurs physiologiques et la durée d'exposition. Ainsi une DLE est déterminée lorsque, par extrapolation, l'une des variables physiologiques (FC, tbu et sud) atteint sa valeur seuil définie ci-dessus. Les DLE calculées ainsi sont basées sur la stabilisation des réactions thermorégulatrices de l'homme lorsque celui-ci est exposé à une contrainte thermique prolongée.

2.7 - Durée de la période d'observation

L'observation d'une situation de travail à la chaleur implique des mesures nombreuses aussi bien physiologiques que physiques. Il est important de connaître la durée nécessaire pour estimer, au mieux, l'astreinte. La relation entre l'astreinte observée et deux indices de prévision, l'un de contrainte (WBGT) et l'autre d'astreinte (Sudation Requise), a été calculée pour des durées croissantes d'observation par palier de 30 minutes jusqu'à 4 heures d'observation. L'évolution des différents paramètres de ces relations, en fonction de la durée d'observation, donne le temps d'observation nécessaire à une bonne prévision de l'astreinte.

3 - RESULTATS

Ce chapitre comporte essentiellement les résultats moyennés sur l'ensemble des postes. Les résultats obtenus sur les postes pris individuellement sont reportés à l'annexe II. Dans ce chapitre sont présentés successivement :

- les caractéristiques des paramètres physiques des ambiances aux postes étudiés,
- les niveaux d'astreinte mesurés,
- les régressions linéaires entre les résultats des indices et l'astreinte sudorale mesurée pour les 60 salariés,
- les régressions linéaires les plus intéressantes entre les différents indices de contrainte ou d'astreinte.

Toutes les régressions ont été calculées par la méthode des moindres carrés non pondérés.

Enfin deux paragraphes présentent :

- une comparaison des durées limites d'exposition (DLE) définies par les indices (Sudation Requête et WBGT) et ceux obtenus selon différents critères physiologiques d'astreinte,
- les résultats du calcul de la durée optimale de mesure pour aboutir à la meilleure prédiction de l'astreinte.

3.1 - Plages de contraintes et d'astreintes étudiées

3.1.1 - Paramètres physiques

Compte tenu de la variété des ambiances étudiées, une représentation globale de l'exposition des soixante salariés est présentée dans la figure 3. Pour ce faire, les quatre paramètres de la contrainte (t_a , t_r , P_{aH_2O} et V_a) une représentation sous forme d'histogramme est présentée à la figure 3. Les classes des histogrammes ont une largeur de 3°C pour t_a , 10°C pour t_r , $0,3 \text{ kPa}$ pour P_{aH_2O} et $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ pour V_a . Le niveau d'une classe, pour les quatre paramètres, correspond au cumul des temps durant lesquels tous les salariés ont été exposés à des valeurs du paramètre appartenant à la classe considérée et sont exprimés en pourcent du temps total de mesure soit environ 230 heures.

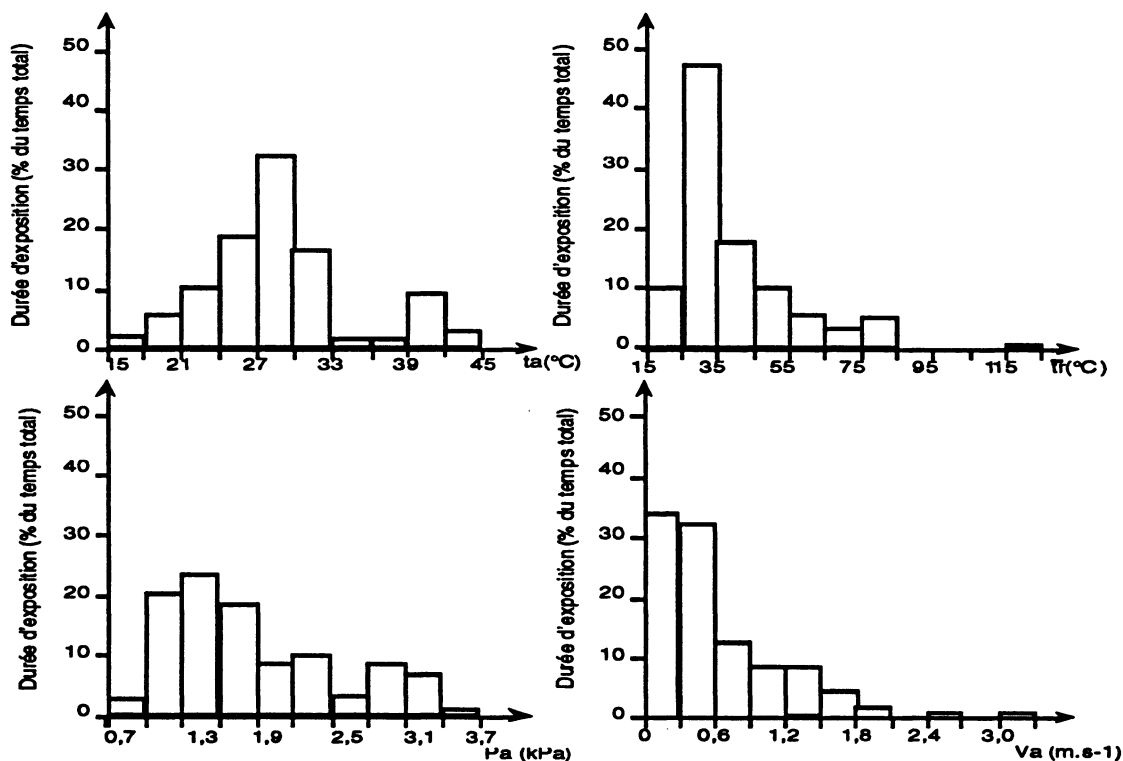


Figure 3 : Histogrammes des paramètres physiques.

Caractéristiques des contraintes thermiques mesurées sur l'ensemble des douze postes de travail. Le niveau de chaque classe est défini par le pourcentage du temps total (230 heures) durant lequel l'ensemble des salariés a été exposé à des valeurs du paramètre appartenant à cette classe.

Les résultats exposés à la figure 3 montrent la plage de valeurs étudiées pour chaque paramètre et la forte prédominance de situations à contrainte thermique moyenne (t_a entre 24 et 33°C ; t_r entre 25 et 45°C et des vitesses d'air inférieures à 0,6 m.s⁻¹) dans plus de 2/3 des cas.

Ainsi, il apparaît que les situations de travail à la chaleur sont de moins en moins nombreuses et que dans ces situations les salariés ont souvent l'occasion de récupérer dans une ambiance thermique confortable au cours du travail (cas de plus de la moitié des postes étudiés au cours de cette campagne). Les durée d'exposition à une contrainte exogène constante (cf. annexe II) sont variables d'un poste à l'autre ; les moyennes inter-poste des caractéristiques de la distribution de ces durées sont :

- durée moyenne : 17,6 min ($\sigma = 32,8$ min),
- durée maximale : 50,5 min ($\sigma = 43,7$ min),
- durée minimale : 4,5 min ($\sigma = 30,1$ min),
- mode moyen des distributions : 9,8 min ($\sigma = 30,8$ min).

L'analyse des temps d'exposition montre que la durée moyenne est courte et surtout que beaucoup d'expositions sont très brèves et expliquent la différence entre la durée moyenne et le mode. Les résultats par poste (annexe II) montrent que pour 7 d'entre eux la durée moyenne d'exposition à une ambiance stable est inférieure à 8 minutes.

3.1.2 - Grandeurs physiologiques

La figure 4 présente les durées d'exposition à différents niveaux de dépenses énergétiques des salariés étudiés.

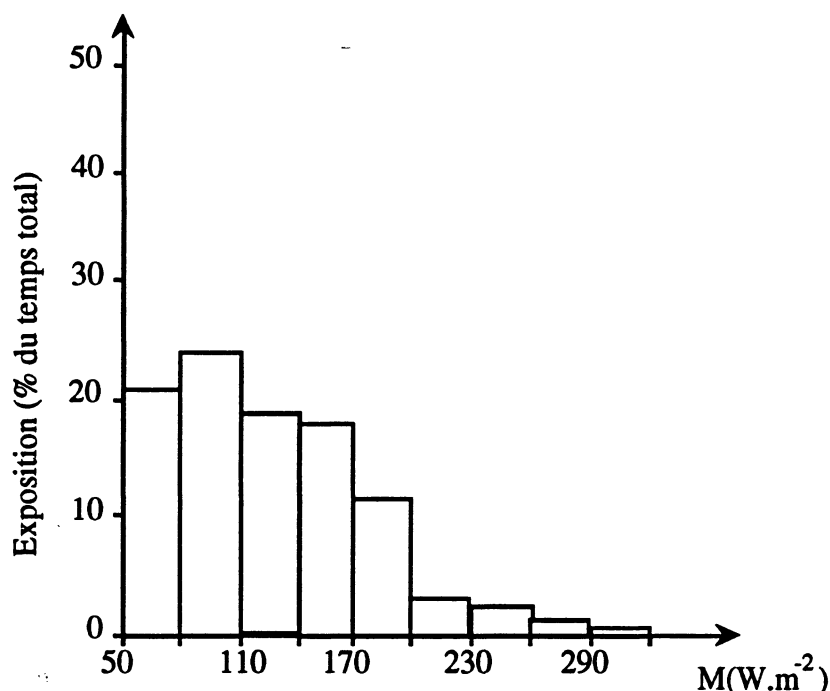


Figure 4 : Histogramme des dépenses énergétiques (M en W.m²) des 60 sujets. Le niveau de chaque classe est défini selon la méthode employée à la figure 3.

Ces résultats mettent en évidence que des métabolismes énergétiques supérieurs à 200 W.m⁻² sont exceptionnels (moins de 10 % du temps). Par contre, pour des

métabolismes inférieurs à 170 W.m^{-2} la distribution est très homogène (environ 20 % du temps pour chaque classe). La figure 5 rend compte des niveaux de débits sudoraux mesurés au cours de cette étude, représentés selon la même méthode que ci-dessus.

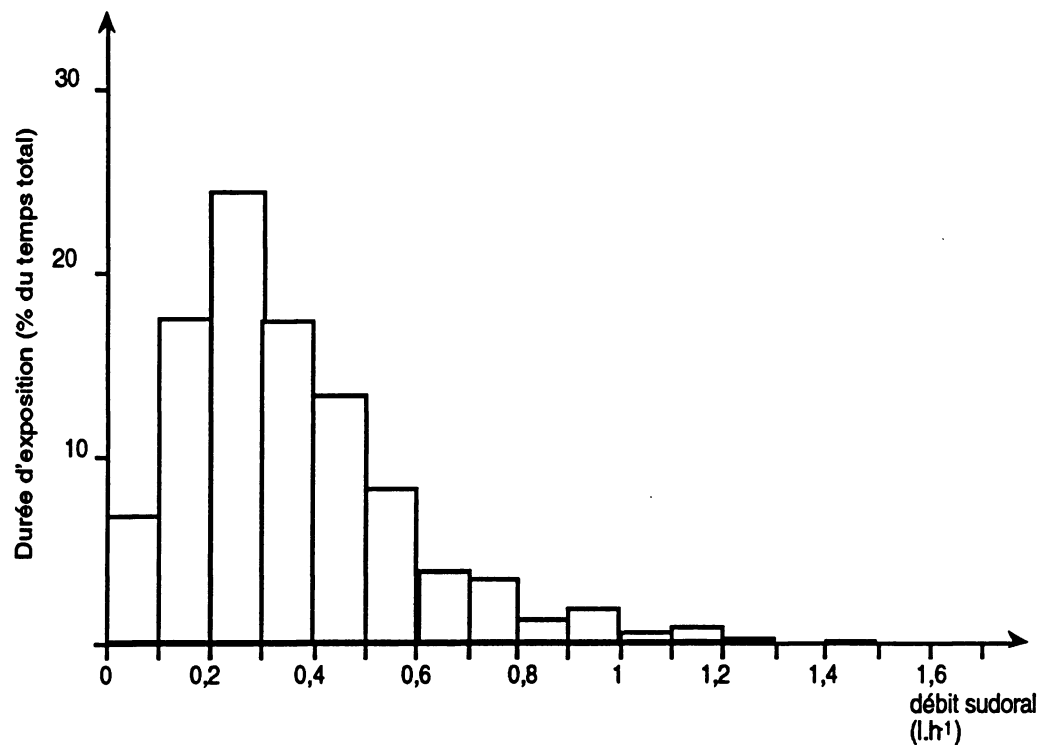


Figure 5 : Histogramme des valeurs de débits sudoraux (en gr.h^{-1}) des 60 salariés. Le niveau de chaque classe est défini comme à la figure 3.

Les débits sudoraux mesurés sont inférieurs à $0,5 \text{ l.h}^{-1}$ durant 80 % du temps d'observation. Les variations entre le début et la fin des périodes de mesures de la température buccale (Dtbu) et de la fréquence cardiaque de repos assis (DFC) avaient pour moyenne et écart-type respectivement :

	Moyenne	Ecart-type
DFC	7,0	8,1
Dtbu	0,25	0,31 (°C)

La relation liant l'élévation de température buccale (Dtbu) à la variation de fréquence cardiaque de repos (DFC) est de la forme :

$$\text{Dtbu} = 0,025 \text{ DFC} + 0,09$$

n = 50 r = 0,64 p < 0,01

où Dtbu est en °C et DFC est en batt.min^{-1}

Cette relation est très proche de celles décrites par d'autres auteurs sur la base d'expériences de laboratoire où la température rectale est l'indicateur de la température centrale (VOGT, 1970 ; KAMON, 1972 ; TANAKA et coll., 1978). Elle indique cependant, que si la température buccale est prise comme référence de température centrale, une élévation de $0,8^{\circ}\text{C}$ de celle-ci doit être une limite à ne pas dépasser (niveau alarme ISO/DIS 7933). Cette variation de Tbu entraîne en effet une augmentation de FC de repos égale à 30 battements par minute, qui est considérée comme une valeur limite par KAMON (1972). Aucune relation n'a pu être mise en évidence entre Dtbu ou DFC et la sudation mesurée.

3.2 - Corrélations entre les indices calculés et l'astreinte sudorale mesurée

Le tableau 2 présente les paramètres des relations linéaires qui lient les valeurs des différents indices à la sudation mesurée. Pour chaque salarié, la valeur cumulée de sudation et d'indice calculé sur la totalité de la période d'observation (en général 4 heures) a été retenue pour le calcul de ces relations.

Sudation mesurée = a . indice + b (n = 60)						
Indice	Calcul	Unité	a	b	r	SEE
Sureq	ISO	g.min ⁻¹	0,97	1,23	0,84	1,46
	ISOexpo	g.min ⁻¹	1,07	1,14	0,83	1,48
	ISOmod	g.min ⁻¹	0,49	2,76	0,57	2,23
P4SR	séq/séq	l.(4h) ⁻¹	1,67	2,82	0,61	2,14
	expo	l.(4h) ⁻¹	2,08	2,41	0,64	2,1
ITS	séq/séq	g.min ⁻¹	0,54	2,61	0,74	1,82
	expo	g.min ⁻¹	0,68	2,32	0,76	1,76
Teq	séq/séq	°C	0,18	1,65	0,34	2,55
	expo	°C	0,17	2,05	0,31	2,58
WBGT	séq/séq	°C	0,47	- 5,74	0,63	2,11
	expo	°C	0,50	- 6,38	0,63	2,10
ET	séq/séq	°C	0,62	- 10,11	0,65	2,04
	expo	°C	0,64	- 10,43	0,67	2,00
ET*	séq/séq	°C	0,47	- 8,6	0,62	2,11
	expo	°C	0,48	- 9,0	0,65	2,05
PMV	séq/séq	SD	1,03	2,93	0,78	1,67
	expo	SD	1,14	2,86	0,78	1,67
HSI	Non significatif					

Tableau 2 : Pentes (a), ordonnées à l'origine (b), coefficients de corrélation (r) et erreur standard de l'estimation (SEE) des relations linéaires qui lient la sudation mesurée (g.min⁻¹) aux différents indices. La troisième colonne du tableau indique l'unité des indices.

Ces relations ne rendent compte que de la plus ou moins bonne corrélation entre l'indice calculé et l'astreinte sudorale. L'indice PMV, bien que hors de son domaine d'application qui concerne le confort thermique, permet une prévision de l'astreinte qui est meilleure que celle obtenue avec tous les autres indices hormis la Sudation requise (ISO et ISOexpo).

Pour permettre une analyse comparative simple de toutes ces relations, tous les indices sont exprimés en % (cf. 2.5). L'expression en % des différents indices permet, en plus de la comparaison des coefficients de corrélation respectifs, de visualiser l'adéquation de l'échelle de chaque indice, et celle de l'astreinte sudorale. Ainsi, plus la pente de la régression se rapproche de l'unité et son ordonnée à l'origine de zéro, meilleure est la prévision de la sudation. Il est à noter que sous cette formulation l'indice PMV est représenté sous sa forme dérivée le PPD.

Le tableau 3 présente les paramètres des relations linéaires qui lient les résultats des différents indices à l'astreinte sudorale mesurée. Toutes les grandeurs sont exprimées en %.

Sudation mesurée = a . indice + b (n = 60)					
Indice	Calcul	a	b	r	SEE
Sureq	ISO	0,97	9,8	0,84	11,6
	ISOexpo	1,07	9,0	0,83	11,8
	ISOmod	0,49	22,1	0,57	17,8
P4SR	séq/séq	0,40	22,6	0,61	17,1
	expo	0,49	19,5	0,64	16,5
ITS	séq/séq	0,54	20,8	0,74	14,5
	expo	0,67	18,6	0,76	14,0
HSI	séq/séq	0,05	43,9	0,13	21,5
	expo	0,07	42,7	0,16	21,4
Teq	séq/séq	0,079	45,8	0,32	20,5
	expo	0,073	46,7	0,29	20,7
WBGT	séq/séq	0,44	22,7	0,57	17,7
	expo	0,46	22,4	0,58	17,6
ET	séq/séq	0,52	21,0	0,59	17,5
	expo	0,57	18,2	0,63	16,7
ET*	séq/séq	0,69	15,7	0,60	17,3
	expo	0,78	11,1	0,66	16,2
PMV	séq/séq	0,65	- 0,7	0,55	18,1
	expo	0,54	7,9	0,56	17,9

Tableau 3 : Pentés (a), ordonnées à l'origine (b), coefficients de corrélation (r), erreur standard (SEE) des relations entre la sudation mesurée et la contrainte ou l'astreinte calculée par les différents indices.

Les résultats du tableau 3 montrent que :

- la meilleure prévision de la sudation est assurée par l'indice Sudation Requise (ISO) dont la pente est proche de 1, l'ordonnée à l'origine faible, le coefficient de corrélation le plus élevé et l'erreur standard de l'estimation la plus faible ;
- l'indice Sudation Requise (ISO) permet une prévision avec une erreur standard de l'estimation de 11,6 % soit près de 80 g.h⁻¹ (750 x 0,116). L'intervalle de confiance à 95 % de la prévision est de 160 g.h⁻¹ ;
- ET et WBGT ont des résultats très voisins et sont les indices empiriques les moins mauvais. L'imprécision des résultats obtenus avec ces indices montre qu'il est nécessaire d'être très prudent lors de leur interprétation ;
- les résultats obtenus avec ITS sont acceptables. Les indices HSI et P4SR ne permettent pas de prévoir l'astreinte thermique dans toutes les situations de travail rencontrées au cours de cette étude ;
- hormis celle de Sudation Requise (ISO ou ISO expo) toutes les relations Sudation mesurée = f (Sudation estimée) ont une pente inférieure à 0,8 et une ordonnée à l'origine importante. Ceci

traduit le fait qu'ils sous-estiment la sudation lorsque celle-ci est faible et la surestiment lorsqu'elle est élevée ;

- dans le cas de Sudation Requise (ISO) la sous-estimation de l'astreinte est pratiquement constante sur toute la plage étudiée et représente environ 70 g.h⁻¹ ;
- l'utilisation de la méthode de calcul exponentiel des valeurs des paramètres de base entraîne, pour tous les indices, une sous-estimation de la charge thermique par rapport à celle obtenue par le calcul simple séquence par séquence. La méthode de calcul exponentiel améliore dans tous les cas, sauf pour la Sudation Requise et Teq, la qualité de la régression de l'astreinte mesurée en fonction de l'indice calculé.

Les résultats présentés aux tableaux 2 et 3 sont calculés à partir des grandeurs mesurées cumulées sur des périodes d'observation complètes, en général 4 heures. Mais comme les salariés étaient pesés à intervalles réguliers (cf. 2.3.2.5), il est possible de calculer les pertes sudorales à chaque pesée puis de les comparer à la contrainte calculée durant la même période appelée phase de travail. Les relations entre l'astreinte sudorale mesurée et les résultats des différents indices ont été calculées pour toutes les phases d'expositions, entre deux pesées d'un salarié, soit 430 phases. Les paramètres de ces relations sont présentés au tableau 4. Tous les résultats sont exprimés en %.

Sudation mesurée = a . indice + b (n = 430)					
Indice	Calcul	a	b	r	See
Sureq	ISO	0,90	15,0	0,71	21,3
	ISOexpo	1,10	9,1	0,69	21,7
	ISOmod	0,55	19,9	0,53	25,7
P4SR	séq/séq	0,44	22,3	0,56	25,1
	expo	0,55	17,3	0,55	25,3
ITS	séq/séq	0,55	22,9	0,63	23,4
	expo	0,72	17,7	0,63	23,4
HSI	séq/séq	0,12	39,1	0,25	29,4
	expo	0,12	39,8	0,21	29,7
Teq	séq/séq	0,10	46,2	0,30	28,9
	expo	0,09	47,3	0,25	29,3
WBGT	séq/séq	0,43	25,5	0,56	25,0
	expo	0,53	19,6	0,54	25,4
ET	séq/séq	0,48	25,2	0,57	24,9
	expo	0,61	17,1	0,56	25,1
ET*	séq/séq	0,62	22,1	0,56	25,0
	expo	0,80	11,4	0,56	25,0
PPD	séq/séq	0,54	9,9	0,49	25,4
	expo	0,48	13,6	0,44	27,1

Tableau 4 : Pentas (a), ordonnées à l'origine (b), coefficients de corrélation @ et erreurs standard de l'estimation (see) pour les relations linéaires qui lient la sudation mesurée, au cours des 430 séquences d'exposition, aux résultats des indices calculés pendant ces mêmes phases. Toutes les grandeurs sont en %.

Les résultats du tableau 4 montrent que :

- la prévision de l'astreinte sudorale réalisée sur des phases de mesures relativement courtes (32 minutes en moyenne) ne permet pas, pour un intervalle de confiance à 95 % une précision inférieure à 310 g.h^{-1} ;
- dans ce cas, la méthode de calcul exponentiel n'améliore pas la prévision de l'astreinte sudorale. Or, c'est sur des périodes de mesures courtes que cette technique de calcul devrait, a priori, améliorer le plus sensiblement le modèle.

Les figures ci-dessous présentent les relations entre l'astreinte sudorale mesurée et la Sudation Requise (ISO) d'une part (figure 6) et WBGT d'autre part (figure 7). Ces résultats sont ceux obtenus sur la durée totale d'observation (4 heures en général) pour chaque salarié ($n = 60$).

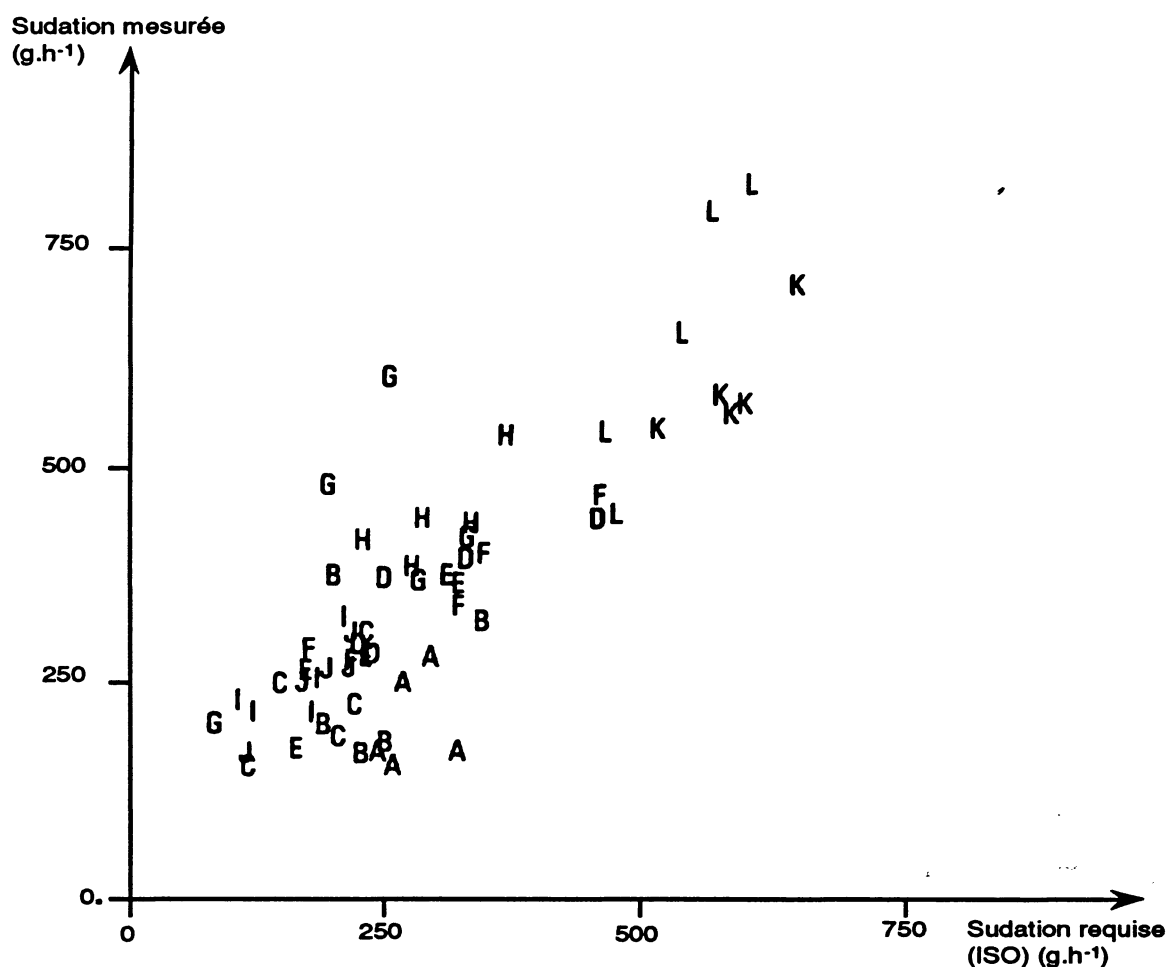


Figure 6 : Evolution de la sudation mesurée en fonction de la Sudation Requise (ISO). Chaque sujet est représenté par une lettre qui correspond au poste occupé par le salarié (Cf. 2.1).

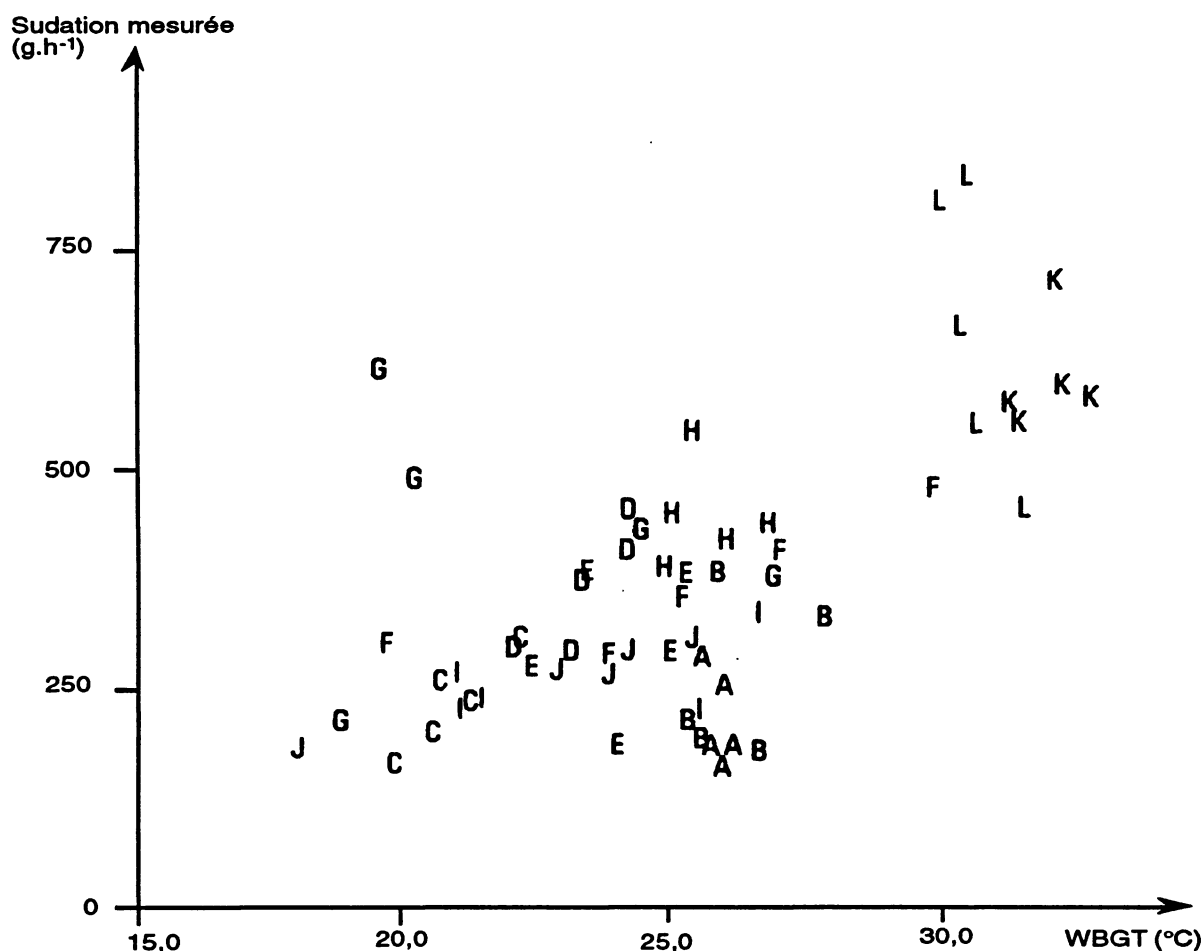


Figure 7 : Evolution de la sudation mesurée en fonction du WBGT. La signification des lettres est la même qu'à la figure 6.

La représentation graphique des résultats (figures 6 et 7) met en évidence deux particularités :

- en situation où la pression partielle de vapeur d'eau est élevée, l'indice Sudation Requisite surestime la sudation mesurée (postes A et B) ;
- au poste de lamineur (poste G) la sudation mesurée (480 et 610 g.h⁻¹) de deux salariés est très supérieure à la sudation calculée. Cette différence est vraisemblablement due à une erreur de méthodologie de mesure de la température de rayonnement ($\bar{t}_r$). En effet, ces deux salariés travaillaient en poste de matin durant lequel la température d'air (t_a) était inférieure à 20°C. A ce poste la source radiante est intermittente et, du fait de la t_a basse, la température de globe s'est stabilisée à un niveau qui correspondait à une valeur de $\bar{t}_r$ plus faible que la $\bar{t}_r$ effective. Il n'a pas été possible de contrôler, à l'aide d'un capteur de $\bar{t}_r$ à temps de réponse court, la $\bar{t}_r$ effective. Par contre, au poste d'après-midi, l'activité de laminage des trois autres salariés du poste G a été réduite. De ce fait les expositions à la source radiante intermittente étaient moins fréquentes et de plus, du fait du travail l'après-midi, les t_a mesurées étaient comprises entre 23 et 30°C. Ainsi pour ces trois salariés l'incidence de l'erreur de méthodologie de mesure de $\bar{t}_r$ sur la contrainte calculée était très réduite et, de fait, la prévision de l'astreinte donnée par l'indice Sudation Requisite est acceptable pour ces trois salariés.
- les résultats reportés à la figure 7 montrent également que pour des valeurs de WBGT comprises entre 24 et 27°C l'astreinte sudorale mesurée est très variable pour une même valeur de WBGT.

Les résultats présentés à la figure 6 montrent que la sudation calculée par l'indice Sudation Requisite est nettement différente de la sudation mesurée à trois postes (cf. ci-dessus A, B et G).

Les relations linéaires entre la sudation mesurée et les résultats des trois méthodes de calcul de sudation requise ont donc été établies après avoir retiré ces trois postes de l'échantillon total. Le tableau 5 présente les relations entre l'astreinte sudorale mesurée et les astreintes prédites par l'indice Sudation Requise sous ses trois formes de calcul à partir des mesures réalisées à 9 postes de travail. Toutes les grandeurs sont exprimées en %.

Sudation mesurée = a . indice + b (n = 45)				
Indice	a	b	r	SEE
Sureq ISO	0,99	10,1	0,93	8,1
ISOexpo	1,12	8,0	0,94	7,1
ISOmod	0,84	7,7	0,92	8,3

Tableau 5 : Pentas (a), ordonnées à l'origine (b), coefficient de corrélation (r) et erreur standard de l'estimation (see) des relations qui lient la sudation mesurée à l'astreinte calculée selon les trois méthodes appliquées à l'indice Sudation Requise. Les relations sont établies à partir des résultats de 9 postes. Les situations humides (postes A et B) et à rayonnement intermittent (poste G) ont été retirées de l'échantillon.

Les relations du tableau 5 montrent que :

- dans des situations de travail où la pression partielle de vapeur d'eau est inférieure à 2,8 kPa et où la mesure de la tr est réalisable avec un thermomètre à globe noir, les relations entre la sudation mesurée et l'indice Sudation Requise sont très bonnes. Les coefficients de corrélations sont comparables quelle que soit la méthode de calcul de l'indice Sudation Requise. La meilleure prédiction est donnée par la méthode ISO pour laquelle la pente est proche de 1 ;
- la méthode de calcul ISOmod fournit des résultats meilleurs que ceux obtenus sur l'ensemble des postes (tableaux 2, 3 et 4). Ceci tient au fait qu'elle surestime de façon très importante l'astreinte thermique observée aux deux postes à humidité importante (postes A et B) ce qui explique que la méthode ISOmod aboutisse à des résultats très différents de ceux obtenus avec les deux autres méthodes de calcul de la Sudation Requise (tableaux 2, 3 et 4) lorsque les deux postes, A et B, sont retirés de l'échantillon sur lequel les relations du tableau 5 sont calculées ;
- malgré ces très bonnes corrélations l'intervalle de confiance (à 95 %) de la prévision est de $\pm 120 \text{ g.h}^{-1}$ environ.

Enfin, une autre expression de WBGT peut être présentée sous la forme d'une différence (DWBGT = WBGT - WBGTlim) entre sa valeur mesurée et sa valeur limite (WBGTlim = 35,5 - 0,039.M) où M est la dépense énergétique (en W.m^{-2}). La relation qui lie la sudation mesurée à DWBGT est de la forme :

$$\text{Sudation mesurée} = 0,44 \text{ DWBGT} + 9,09$$

$$r = 0,61 \quad n = 60$$

Lorsque chaque phase de mesure, entre deux pesées du salarié, est prise en compte, la relation devient :

$$\text{Sudation mesurée} = 0,44 \text{ DWBGT} + 9,45$$

$$r = 0,56 \quad n = 430$$

Dans ces deux relations la sudation mesurée est exprimée en grammes par minute et DWBGT en °C.

3.3 - Relations entre les différents indices calculés

Le tableau 6 présente les paramètres des relations linéaires les plus intéressantes qui lient les différents indices étudiés, (exprimés en %). Les résultats correspondant aux différents indices sont ceux obtenus par la technique de calcul séquence/séquence sauf pour Sudation Requise où les trois méthodes sont considérées.

$Y = a \cdot X + b$		$n = 60$		
Y	X	a	b	r
Sureq ISO	ISOexpo	1,10	- 0,7	0,99
	ISOmod	0,61	6,6	0,82
	P4SR	0,47	9,1	0,84
	ITS	0,60	9,2	0,94
	HSI	0,14	24,4	0,41
	Teq	0,123	35,6	0,58
	WBGT	0,54	7,8	0,82
	ET	0,62	6,5	0,82
	ET*	0,83	1,0	0,82
	PPD	0,69	- 12,7	0,67
WBGT	ITS	0,73	21,8	0,76
	ET	1,11	- 0,1	0,96
	ET*	1,44	- 8,5	0,94
P4SR	ITS	1,06	10,9	0,93
	ET	0,89	18,3	0,64
ET	ET*	1,29	-7,4	0,97

Tableau 6 : Pente (a), ordonnée à l'origine (b), coefficient de corrélation (r) des relations linéaires liant les différents indices de contrainte ou d'astreinte entre eux.

Les résultats exposés au tableau 6 montrent des relations très significatives entre :

- Sudation Requise (ISO) et Sudation Requise (ISOexpo), ITS et, dans une moindre mesure, P4SR, WBGT, ET et ET*,
- WBGT et ET ou ET*,
- P4SR et ITS.

3.4 - Détermination des durées limites d'exposition (DLE)

Le tableau 7 rapporte les DLE calculées par extrapolation (cf. 2.6) pour les différentes situations de travail où l'un des critères définis au paragraphe 2.6 indiquait une astreinte excessive pour un travail de 8 heures. Les 4 situations retenues sont les postes :

- Egaliseur (DLE moyenne sur 2 périodes d'exposition par sujet).
- Soudeur (DLE moyenne sur 2 à 3 périodes d'exposition par sujet).
- Situation expérimentale.
- Mineur.

Pour ces postes, les DLE ont été extrapolées à partir de durées d'exposition moyennes de 108,2 minutes ($\sigma = 16,3$ min) pour les Egaliseurs, 32,3 minutes pour les Soudeurs ($\sigma = 7,7$ min), 2,5 heures pour la situation expérimentale et 4 heures pour les mineurs.

Critère de calcul DLE (heures)							
Poste	Sujet	DLEtbu	DLEFC	DLEsud	DLEsub	Sudreq (ISO)	WBGT
Mineur	1	8	8	8	8	7,8	OUI
	2	6,7	5,7	7,5	7,7	7,3	OUI
	3	5	6	6,2	8	6,9	OUI
	4	8	8	8	10	6,1	OUI
	5	8	7,1	6,2	8	5,3	OUI
Egaliseur	1	3,9	5	8	6	8	NON
	2	3,5	3,4	8	3,5	8	NON
	3	5,7	6,8	8	6,5	8	NON
	4	4,3	5,7	8	2,5	8	NON
	5	7,6	8	8	4	8	NON
Sit expé	1	2,1	5,4	8	3,5	8	OUI
	2	4,2	3,7	8	3	8	OUI
	3	4,2	4,7	8	2,5	8	OUI
	4	4,2	4,4	8	2,5	8	OUI
	5	8	8	7,0	4	8	OUI
Soudeur	1	2,4	3,3	8	0,7	8	OUI
	2	1,4	4,5	8	1,2	8	OUI
	3	3,0	1,8	8	1	8	NON
	4	2,4	4,9	8	0,7	8	NON
	5	5,2	3,3	8	1,5	8	NON

Tableau 7 : DLE (heures) selon les différents critères retenus (cf. 2.6) pour les 20 salariés des postes A, I, K et L. Pour WBGT, seul le dépassement (OUI) ou le respect (NON) de la valeur limite a été noté.

Les résultats du tableau 7 montrent que les indices ne permettent pas de prévoir, de façon précise, la durée limite d'exposition. En effet les DLE prévues par les indices (Sudation Requisite et WBGT) ne correspondent pas, en général, aux DLE calculées à partir des limites physiologiques d'astreinte (définies au paragraphe 2.6). L'indice Sudation Requisite permet de prévoir une DLE pour les mineurs. En revanche, pour les trois autres situations où l'humidité est élevée ou le rayonnement important (égaliseur, situation expérimentale et soudeur) la DLE estimée est dangereuse. En effet, l'indice Sudation Requisite ne prévoit pas de DLE inférieure à 8 heures dans ces trois situations. Cependant, sur la base de critères d'astreinte (tbu, FC et subjectif), une exposition non limitée dans le temps est dangereuse pour les salariés à ces trois postes. Quant aux résultats de DLE obtenus grâce à l'application du WBGT ils sont d'utilisation difficile. En effet l'indice WBGT est dangereux pour 8 des 20 salariés retenus pour cette analyse des DLE et ne permet pas d'organisation pratique du travail pour 10 autres salariés pour lesquels la valeur de WBGT interdit toute exposition.

Les DLE déterminées grâce aux indices de prévision de l'astreinte thermique ne sont pas corrélées aux DLE calculées à partir des critères physiologiques et subjectifs. Par contre ces derniers sont corrélés entre eux et obéissent aux relations linéaires suivantes :

$$\begin{array}{llll} \text{DLE}_{\text{tbu}} = 0,93 \cdot \text{DLE}_{\text{FC}} - 0,12 & r = 0,78 & p < 0,01 \\ \text{DLE}_{\text{tbu}} = 0,55 \cdot \text{DLE}_{\text{sub}} + 2,56 & r = 0,72 & p < 0,01 \\ \text{DLE}_{\text{FC}} = 0,45 \cdot \text{DLE}_{\text{sub}} + 3,47 & r = 0,70 & p < 0,01 \end{array}$$

Toutes les DLE sont exprimées en heures.

La première relation découle directement de la corrélation entre l'élévation de la température buccale (Dt_{bu}) et l'accélération de la fréquence cardiaque de repos (DFC) décrite par ailleurs. Les relations entre les DLE définies à partir des critères physiologiques et l'estimation subjective de la durée possible d'exposition montrent l'intérêt du critère subjectif qui est un indicateur simple à utiliser.

3.5 - Temps de mesure nécessaire à une bonne estimation de l'astreinte sudorale

La durée d'observation de chaque poste avait été fixée à 4 heures par le groupe de travail de la CECA (cf. 2.3). Ce choix était empirique mais devait permettre, a priori, de couvrir une période suffisante pour une bonne estimation de l'astreinte. De plus, quatre heures correspondent à des temps de travail sans interruption très fréquents en industrie. Cependant la charge de travail de l'expérimentateur autant que la gêne du salarié dans l'étude de la contrainte thermique en situation industrielle est telle que la durée d'observation doit être réduite. Il est donc nécessaire de déterminer la durée optimale d'une observation. Pour ce faire les relations Sudation mesurée = $f(\text{indice})$ ont été calculées pour des durées croissantes de mesures de 30 minutes à 2,5 heures par incréments successifs de 30 minutes. La durée de 2,5 heures était imposée, pour conserver un échantillon homogène, car plusieurs observations duraient moins de 3 heures. Les caractéristiques des relations entre l'astreinte observée et l'astreinte calculée par les indices Sudation requise (ISO) et WBGT sont représentées à la figure 8. Les valeurs qui correspondent aux mesures de 4 heures d'observation sont calculées à partir des résultats finaux des 60 salariés, et de ce fait pas toujours après 4 heures d'observation. La durée optimale de mesure est celle qui permet dans le minimum de temps d'obtenir une prédiction de l'astreinte sudorale égale à celle que permet l'observation durant quatre heures.

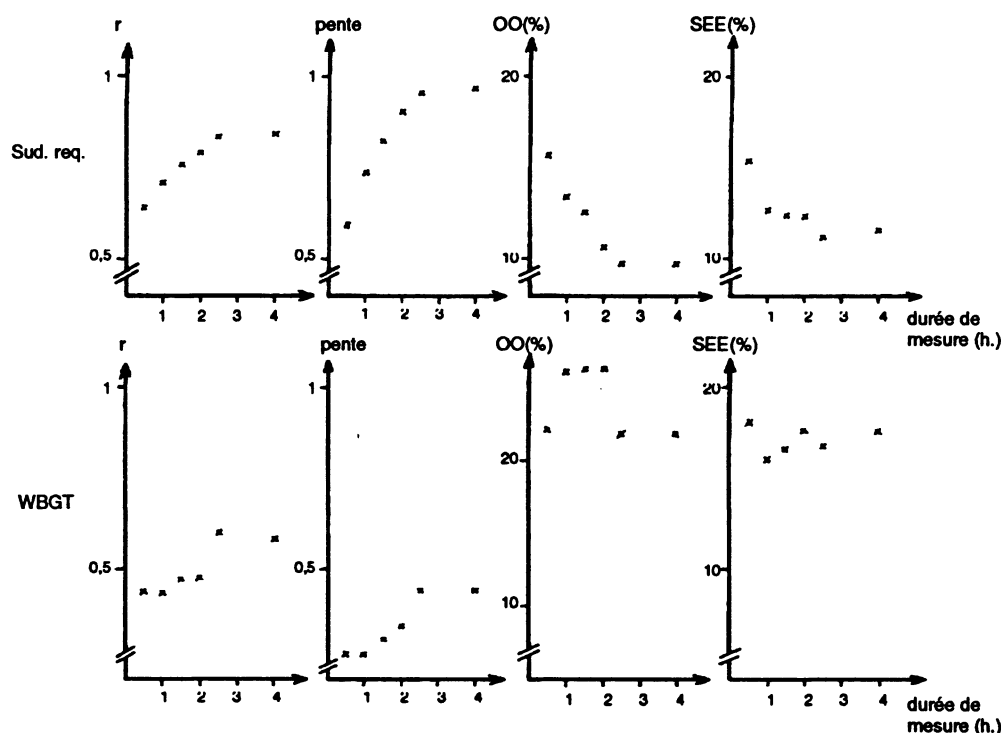


Figure 8 : Evolution, en fonction de la durée des mesures, des coefficients de corrélation (r), pentes, ordonnées à l'origine (OO) et erreur standard (SEE) des relations qui lient la sudation mesurée aux résultats des indices Sudation requise (8a) et WBGT (8b).

Les résultats de la figure 8 montrent que la relation entre l'astreinte mesurée et l'astreinte calculée est identique, lorsque le temps de mesure est de 2,5 heures ou 4 heures (fig. 8a). Pour les résultats de l'indice Sudation Requisite ceci est vrai quel que soit le critère considéré : le coefficient de corrélation, la pente, l'ordonnée à l'origine ou l'erreur standard de l'estimation. Cette durée n'est pas aussi nettement définissable lorsque l'astreinte est comparée à un indice de contrainte (fig. 8b). Un temps de mesure plus court peut être envisagé dans ce dernier cas, principalement parce que l'erreur de prévision de cet indice est élevée même après quatre heures de mesure. D'autre part des observations plus courtes n'altèrent pas de façon importante le coefficient de corrélation et l'erreur standard de l'estimation est la plus faible après 1 heure de mesure. Ainsi pour l'indice WBGT une durée de mesure de 1 heure, retenue dans les textes de normes ISO et AFNOR, est pertinente.

4 - DISCUSSION

Les résultats de cette étude amènent à poser trois questions :

- Parmi les indices étudiés, quel est le meilleur indice de prévision de l'astreinte thermique ?
- Cet indice permet-il d'éviter que des salariés qui travaillent en ambiances chaudes soient exposés à des astreintes thermiques excessives ?
- Quelles modifications de cet indice peuvent améliorer la prévision de l'astreinte, ou du moins la rendre plus sûre ?

4.1 - Choix du meilleur indice

Dans les conditions hygrothermiques rencontrées au cours de cette étude les résultats montrent que l'indice Sudation Requisite (ISO) permet la meilleure prévision de l'astreinte thermique pour l'ensemble des postes. En effet, le coefficient de corrélation, la pente, l'ordonnée à l'origine ou l'erreur standard d'estimation des relations qui lient la sudation mesurée aux différents indices montrent que c'est la Sudation Requisite qui permet la prévision la plus proche de la valeur mesurée de sudation et la plus faible erreur standard d'estimation (80 g.h^{-1}). Cependant, en situation industrielle la détermination de l'indice Sudation Requisite est délicate car les mesures des grandeurs physiques et les sources d'erreurs sont nombreuses. Compte tenu de ces difficultés et complications, il est sans doute préférable de faire une première approximation de la contrainte à l'aide d'un indice simple et de n'utiliser Sudation Requisite que si les résultats obtenus avec l'indice simple dépassent un seuil critique. L'indice WBGT, d'utilisation relativement aisée et largement utilisé (RAMANATHAN et BELDING, 1973 ; RAMSEY, 1978 ; RAMSEY et CHAI, 1983), pourrait être employé dans une première phase d'étude de poste afin d'évaluer la sévérité de l'ambiance. Mais les résultats de la présente étude montrent que si le WBGT dépasse une valeur de 25°C les astreintes observées peuvent être très différentes pour une même valeur de WBGT (fig. 7) et atteindre des niveaux critiques dès que l'indice WBGT est supérieur à 25°C . Cet indice ne peut donc être utilisé en toute sécurité que dans des ambiances où sa valeur mesurée est inférieure à 25°C .

Ainsi, l'utilisation des indices de contrainte thermique aux postes de travail peut être scindée en deux étapes : une première phase d'approche réalisée grâce au WBGT qui, si sa valeur mesurée est supérieure à 25°C , nécessite le passage de la deuxième phase qui est l'utilisation de l'indice Sudation Requisite. Cette démarche permet d'éliminer toutes les situations sans risques thermiques importants grâce à des mesures simples et de s'attacher à l'analyse précise, grâce à l'indice Sudation Requisite, de situations de travail dans lesquelles la santé des travailleurs est menacée. Cette démarche appliquée aux situations de travail analysées dans la présente étude aurait, par exemple, évité des mesures longues dans plus du tiers des postes étudiés (fig. 7). Si l'indice Sudation Requisite est la meilleure modélisation de l'astreinte thermique, il est important de savoir si cette précision apporte un gain de sécurité lors de son utilisation en situation réelle.

4.2 - Intérêt pratique de l'indice Sudation Requisite

L'indice Sudation Requisite, comme tous les indices analytiques basés sur le calcul du bilan thermique, permet de prévoir les pertes sudorales d'une part et le stockage de chaleur d'autre part. A partir de ces deux grandeurs, des durées limites d'exposition (DLE) sont déterminées (cf. 2.6). Les DLE calculées (cf. 3.5) montrent que l'indice Sudation Requisite ne permet pas, dans sa forme actuelle et dans n'importe quelle condition thermique, de déterminer de façon sûre des DLE. En effet, hormis la situation de travail minier où la prévision est bonne, aux trois autres postes (Egaliseur, Soudeur et Situation expérimentale) les DLE estimées par l'indice Sudation Requisite sont toujours très nettement supérieures aux DLE déterminées sur des bases physiologiques (élévation de la température centrale et débit sudoral mesuré) ou subjectives. A l'un des postes (Soudeur) la durée réelle d'exposition a été trop brève pour permettre un calcul fiable des DLE par extrapolation mais dans les deux situations à expositions longues (Egaliseur et Situation expérimentale) la discordance est également importante entre les DLE prévues par l'indice et celles déterminées à partir des grandeurs physiologiques mesurées. L'incapacité de l'indice Sudation Requisite à prévoir une DLE précise est la conséquence de l'imprécision de la prévision dont l'intervalle de confiance à 95 % est de $\pm 160 \text{ g.h}^{-1}$. Une telle erreur équivaut à un stockage de chaleur qui entraîne une augmentation de la température centrale de $1,6^{\circ}\text{C}$ en 1 heure pour un sujet de 70 kg. La discordance entre des DLE calculées et observées (cf. 3.5) avait été relevée par WADSWORTH et PARSONS (1986) pour des sujets vêtus en situation de laboratoire, par contre VOGT et coll. (1983) ont trouvé, dans des situations industrielles une bonne concordance entre les DLE calculées et observées. Les conditions thermiques relevées par VOGT et coll. (1983) étaient, en général, sèches et t_a et t_r étaient toujours très proches. Le poste de mineur, pour lequel la détermination de DLE est précise, est le seul dont les conditions thermohygrométriques se rapprochent de celles rapportées par VOGT et coll. (1983). En réduisant la limite de sudation de 750 à 600 g.h^{-1} les DLE seraient, en général, plus sûres. Plusieurs études ont montré que les capacités de sudation de l'homme dépendent de son niveau d'acclimatement (WYNDHAM et coll.; 1964 ; GOLDMAN et coll., 1965 ; WYNDHAM et coll., 1966). La limite de 600 g.h^{-1} couvre 90 % des débits sudoraux mesurés au cours de la présente étude (fig. 5) et correspond à un niveau d'acclimatement à la chaleur qui peut être considéré comme courant. Par contre les débits supérieurs à 750 g.h^{-1} sont rares et de ce fait impliquent un niveau d'acclimatement que peu de salariés possèdent. Cependant dans les situations retenues pour le calcul des DLE (cf. 3.5) cette modification de la limite supérieure de sudation ne permet pas de donner des valeurs exactes de DLE. En effet, trois des postes (Egaliseur, Soudeur et Situation expérimentale) mettent en évidence deux facteurs d'influence de l'astreinte qui ne sont pas assez connus et que l'indice Sudation Requisite ne modélise pas de façon satisfaisante à savoir :

- a) L'isolement du vêtement dans le cas où le rayonnement est élevé. Une expérience a été menée au laboratoire, dans des conditions thermiques identiques à celles de la situation expérimentale ($t_r = 80^{\circ}\text{C}$, $t_a = 42^{\circ}\text{C}$, et $P_{aH_2O} = 1,2 \text{ kPa}$) avec 10 sujets nus et vêtus (0,6 clo). Les résultats, non présentés ici, montrent que pour les sujets nus la prévision de DLE par l'indice Sudation Requisite est très bonne. Par contre, pour les sujets vêtus la DLE calculée avec l'indice Sudation Requisite est de plusieurs heures et surestime de façon importante les durées d'exposition possibles calculées sur la base des indices physiologiques (t_{bu} , F_c et débit sudoral). Ces dernières sont en effet comprises entre 1 et 2 heures pour les 10 sujets.
- b) L'influence du vêtement sur les capacités évaporatoires maximales en situations très humides. Dans la situation à forte humidité (poste d'égaliseur) les vêtements des salariés sont très vite mouillés et collent à la peau. Dans ces conditions la température de surface qui intervient dans les échanges thermiques avec l'environnement est la température du vêtement. Celle-ci est plus basse que la température de la peau et les capacités évaporatoires sont alors plus faibles que celles calculées à partir de la température cutanée du fait de la diminution du gradient de pressions partielles de vapeur d'eau entre la surface d'échange sujet-ambiance et l'ambiance elle-même.

En résumé, il est impossible de prévoir, dans n'importe quelle situation thermohygrométrique, une DLE suffisamment fiable, à partir d'un indice dont l'intervalle de confiance équivaut à des stockages de chaleur inacceptables. L'erreur d'estimation est plus

importante dans certaines conditions (humidité élevée et rayonnement important) où l'influence du vêtement sur les échanges de chaleur n'est pas assez connue.

De plus, les facteurs individuels : l'âge (LIND et coll., 1970), l'état d'hydratation (GREENLEAF et CASTLE, 1971 ; CANDAS et coll., 1986), le type d'alimentation (LIND, 1963), le type de travail, positif ou négatif (SMILES et ROBINSON, 1971) ou la saison (MINARD et coll., 1971) ont une influence sur le débit sudoral. L'effet de ces facteurs conforte l'idée d'une réduction des limites d'astreintes sudorales préconisées par la norme ISO/DIS 7933.

L'utilisation des mesures physiologiques, température centrale et débit sudoral, est souhaitable dès que l'indice Sudation Requise est supérieur à 600 g.h⁻¹. Des mesures physiologiques simples ont été utilisées et leurs résultats permettent de connaître le niveau de l'astreinte subie par le salarié (cf. 3.1.2).

4.3 - Amélioration de l'indice Sudation Requise

Au cours de cette étude trois modifications du calcul de Sudation Requise ont été proposées (cf. 2.4) :

- le calcul de la température cutanée moyenne ($\bar{T}_{sk}$) au lieu d'une valeur fixe,
- une formule modifiée du calcul du rendement évaporatoire de la sudation,
- la prise en compte en plus de la valeur de la contrainte à l'instant t des niveaux de contraintes des 10 minutes précédentes.

Ces modifications n'améliorent pas, dans cette étude, la précision de la prévision de l'astreinte. Les modifications proposées l'ont été au regard des connaissances actuelles sur l'adaptation de l'homme au travail à la chaleur. Elles sont basées sur des expériences de laboratoire et valables pour des situations à expositions constantes dont la durée est toujours égale ou supérieure à 20 minutes. Les résultats de BELDING et coll. (1966) montrent que des expositions constantes d'une durée de 7,5 minutes peuvent encore être prises en compte de façon satisfaisante par les indices. Mais les durées d'exposition à une ambiance stable mesurées au cours de la présente étude sont brèves (cf. 3.1.1.) et peuvent expliquer la difficulté de modélisation de ces situations de travail réel.

Ces résultats tendraient à montrer que la prise en compte du temps de mise en route de la sudation est compliquée lorsque les expositions sont très brèves et lorsque le sujet exposé porte un vêtement qui réduit les fluctuations des paramètres physiques de contrainte au niveau de la surface cutanée. D'autre part, les résultats relatifs aux durées d'observation (cf. 3.4) montrent que la concordance entre les sudations mesurées et calculées est meilleure lorsque la période d'observation dure au moins 2,5 heures (cf. 3.4). Le fait de cumuler des mesures tend sans doute à améliorer la prévision mais un phénomène d'adaptation lent, décrit par IBERALL (1986), peut aussi expliquer la meilleure prévision observée après des durées de mesures plus longues. Ainsi pour améliorer la prévision de l'astreinte sudorale dans des situations fluctuantes il faudrait considérer en plus des variations rapides des conditions ambiantes, dont la modélisation est à améliorer, les niveaux et l'amplitude de ces variations (WEBB et ANNIS, 1968 ; JOHNSON et coll., 1984) ainsi que des cycles lents d'adaptation de l'homme à la contrainte thermique.

5 - CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent que :

- l'indice Sudation requise est, de tous les indices analysés ici, le plus précis pour prévoir l'astreinte thermique en situations industrielles variées,
 - la fiabilité de la prévision n'est cependant pas suffisante pour calculer de façon sûre des durées limites d'exposition (DLE),
 - l'interaction entre l'isolement vestimentaire et des conditions thermiques à rayonnement ou à humidité élevés n'est pas modélisée de façon correcte par l'indice Sudation requise,
 - les deux modifications du calcul de l'indice Sudation Requête (ISOexpo et ISOmod) n'améliorent pas la qualité de la prévision, de l'astreinte thermique par rapport aux résultats obtenus avec la méthode décrite par la norme,
- l'indice WBGT peut être une approche sommaire de la contrainte thermique. L'imprécision de cet indice sur l'ensemble des conditions hygrothermiques rencontrées au cours de cette étude doit limiter son utilisation à des valeurs mesurées inférieures à 25°C,
- pour toutes les contraintes thermiques plus importantes l'utilisation de l'indice Sudation Requête s'impose. Les limites de débit sudoral devraient, en situation industrielle, être fixées à 600 g.h⁻¹,
- pour toutes les contraintes qui entraînent un débit sudoral supérieur à cette valeur des mesures physiologiques sont nécessaires, à savoir : la perte de poids due à la sudation, les augmentations de la température buccale et de la fréquence cardiaque de repos entre le début et la fin de l'exposition à la contrainte.

6 - BIBLIOGRAPHIE

AFNOR - Association Française de Normalisation, Paris

X 35-201 : Ambiances chaudes : Détermination de l'indice de contrainte thermique WBGT (Température humide et de globe noir), 1980.

X 35-204 : Ambiances chaudes : Détermination analytique de la contrainte thermique, 1982.

BELDING H.S., HATCH T.F. (1955). Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. Heating piping air conditioning, 27 (129-135).

BELDING H.S., HERTIG B.A., KRANING K.K. (1966). Comparison of man's responses to pulsed and unpulsed environmental heat and exercise. J. Appl. Physiol. 21(1), (138-142).

BELDING H.S. (1970). The search for a universal heat stress index in : Physiological and Behavioral Temperature Regulation. Col : J.D. Hardy, A.P. Gagge and J.A.J. Stolwigk Thomas Springfield. Chap. 13 (193-202).

BENZINGER T.H. (1969). Heat regulation : Homeostasis of central temperature in Man. Physiological Reviews, 49, 4, (671-759).

CANDAS V., LIBERT J.P., BRANDENBERGER G., SAGOT J.C., AMOROS C., KAHN J.M. (1986). Hydration during exercise : effects on thermal and cardiovascular adjustments. Eur. J. Appl. Physiol. 55, (113-122).

DAYAL D., RAMSEY J.D. (1977). A heart rate index for assessing heat stress. Proceeding human factors, (537-547).

FANGER P.O. (1972). Thermal Comfort ; Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGRAW-HILL ed. New York.

FULLER F.M., SMITH P.E. (1981). Evaluation of heat stress in hot workshop by physiological measurements. Am. Ind. Hyg. Ass. J., 42, (32-37).

GAGGE A.P., HERRINGTON L.P., WINSLOW C.E.A. (1937). Thermal interchanges between the human body and its atmospheric environment. American Journal of Hygiene, Vol. 26, n° 1, (84-102).

GAGGE A.P., STOLWIJK J.A.J., NISHI Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. ASHRAE Trans, Vol. 77, (247-252).

GIVONI N. (1963). Estimation of the effect of climate on man : development of a new thermal index. Building research station, HAIFA.

GIVONI B., GOLDMANN R.F. (1972). Predicting rectal temperature response to work, environment and clothing. J. Appl. Physiol., 32(6), (812-822).

GREENLEAF J.E., CASTLE B.L. (1971). Exercise temperature regulation in man during hypohydration and hyperhydration. J. Appl. Physiol., 30, (847-853).

HATCH T.F. (1963). Assessment of heat stress in : Temperature : its measurement and Control in Science and Industry. J.D. Hardy Ed. Reinhold Pub. Corp. New York. Chap. 29 (307 - 318).

IAMPIETRO P.F. (1971). Use of the skin temperature to predict tolerance to thermal environments. Aerospace ,Med., 42(4), (396-399).

IBERALL A.S. (1986). Dynamics of mammalian thermoregulation and its circadian component. J. Appl. Physiol., 61(3), (1230-1233).

ISO - International Standard Organisation, Genève

ISO/DIS 7933 : Ambiances thermiques chaudes : Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondée sur le calcul de la sudation requise, 1983

ISO 7726 : Appareils et méthodes de mesure des grandeurs physiques, 1985.

JOHNSON J.M., O'LEARY D.S., TAYLOR W.F., PARK M.K. (1984). Reflex regulation of sweat rate by skin temperature in exercising humans. *J. Appl. Physiol.*, 56 (1283-1288).

KAMON E., BELDING H.S. (1971). Heart rate and rectal temperature relationship during work in hot humid environments. *J. Appl. Physiol.* 31(3), (471-477).

KAMON E. (1972). Relationship of physiological strain to change in heart rate during work in heat. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*, 11, (701-708).

KERSLAKE D.McK. (1972). The stress of hot environments. Cambridge University Press, 1 vol., 316 p.

KUHLEMEIER K.V., MILLER J.M. (1973). Pulse rate/rectal temperature relationship during prolonged work. *J. Appl. Physiol.*, 44(3), (450-454).

LEE D.H.K. (1980). Seventy-five years of searching for a heat index. *Environmental Research*, 22 (331-356).

LIND A.R. (1963). Physiological effects of continuous or intermittent work in the heat. *J. Appl. Physiol.*, 18, (57-60).

LIND A.R., HUMPHREYS P.W., COLLINS K.J., FOSTER K., SWEETLAND K.F. (1970). Influence of age and daily duration of exposure on responses of men to work in heat. *J. Appl. Physiol.*, 28, (50-56).

MAIRIAUX Ph., SAGOT J.C., CANDAS V. (1983). Oral temperature as an index of core temperature during heat transients. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 50, (331-341).

MALCHAIRE J. (1979). The TLV work-rest regiments for occupational exposure to heat : a review of their development. *Am. Occ. Hyg.*, 22, (52-62).

MALCHAIRE J. (1984). Indices de confort et de contrainte thermique. Université Catholique de Louvain, BRUXELLES.

Mc ARDLE B., DUNHAM W., HOLLING H.E., LADDEL W.S.S., SCOTT J.W., THOMSON M.L., WEINER J.S. (1947). The prediction of the physiological effects of warm and hot environments. *Med. Res. Council Report 47/391*, LONDON.

MINARD D., GOLDSMITH R., FARRIER P.H., LAMBIOTTE B.J. (1971). Physiological evaluation of industrial heat stress. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*, 1, (17-28).

MINISTERE DU TRAVAIL (1985). Bilan 1984 des conditions de travail. Cadrage statistique document travail-emploi. La Documentation Française, Paris, 170 p.

NELSON N., EICHNA L.W., HORVATH S.M., SHELLEY W.B., HATCH T.F. (1947). Thermal exchanges of man at high temperatures. *Am. J. Physiol.*, 151, (626-652).

NIELSEN R., MEYER J.P. (1987). Evaluation of metabolism in industrial work. *Ergonomics*, 30, (563-572).

RAMANATHAN M.L., BELDING H.S. (1973). Physiological evaluation of the WBGT index for occupational heat stress. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*, (9), (375-383).

RAMSEY J.D. (1978). Abreviated guidelines for heat stress exposure. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*, 39, (491-495).

- RAMSEY J.D., CHAI C.P. (1983). Inherent variability in heat-stress decision rules. *Ergonomics*, 26(5), (495-504).
- SALTIN B., HERMANSEN L. (1966). Oesophageal, rectal and muscle temperatures during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 21 (1757-1763).
- SHAPIRO Y., PANDOLF K.B., GOLDMANN R.F. (1982). Predicting sweat loss response to exercise, environment and clothing. *Euro. J. Appl. Physiol.*, (48), (83-96).
- SHVARTZ E., BENOR D. (1972). Heat strain in hot and humid environments. *Aerospace Med.*, 43 (8), (852-855).
- SMILES K.A., ROBINSON S. (1971). Regulation of sweat secretion during positive and negative work. *J. Appl. Physiol.*, 30, (409-412).
- SPITZER H., HETTINGER T. (1965). Tables donnant la dépense énergétique en calories pour le travail physique. *L'étude du travail*, 165, (25-43).
- STRYDOM N.B., WYNDHAM C.H., WILLIAMS C.G., MORRISON J.F., BREDELL G.A.G., JOFFE A. (1965). Oral/rectal temperature differences during work and heat stress. *J. Appl. Physiol.*, 20 (2), (283-287).
- TANAKA M., BRISSON G.R., VOLLE M.A. (1978). Body temperatures in relation to heart rate for workers wearing impermeable clothing in a hot environment. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*, 39, (885-890).
- VAIDA I., PAFNOTE M., DIMITRIU M. (1971). *Apreciera gradului de solicitare termica prin determinarea temperaturii cutanate*. *Igiena Bucurest*, Vol. 20 (5), (269-273).
- VOGT J.J., FOEHR R., KIRSCH J., GOLLE F., MEYER-SCHWERTZ M.T. (1970). Estimation des charges de travail et des charges de chaleur en situation réelle de travail : principes et applications d'une nouvelle méthodologie. *Le Travail Humain*, 33, (125-140).
- VOGT J.J., METZ B. (1981). Ambiances thermiques - chapitre 7 (217-263) in : *Précis de physiologie du travail, notions d'ergonomie*, SCHERRER, J. et coll., MASSON, ed. PARIS, 585 p.
- VOGT J.J., CANDAS V., LIBERT J.P., DAULL F. (1981). Required sweat rate as an index of thermal strain in industry. *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*. Ed : K. Cena and J.A. Clark, Elsevier Scientific Publishing Company, Chap 6, (99-110).
- VOGT J.J., SAGOT J.C., PREAU C. (1983). *Etudes sur les conditions de travail en ambiance chaude*. Rapport final convention CNRS 509155/EDF 2079.
- WADSWORTH P.M., PARSONS K.C. (1986). Laboratory evaluation of ISO/OIS 7933 (1983) analytical determination of heat stress. *Proceedings of the ergonomics society's 1986 annual conference*. ed D.J. OBORNE ; TAYLOR and FRANCIS, LONDON 1986.
- WEBB P., ANNIS J.F. (1968). Cooling required to suppress sweating during work. *J. Appl. Physiol.* 25, (489-493).
- WITHERSPOON J.M., GOLDMAN R.F. (1973). Indices of thermal stress. *ASHRAE Symposium Louisville*.
- WYNDHAM C.H., VAN DER MERWE BOUWER W., PATERSON H.F., DEVIMEM M.G. (1953). Examination of heat stress indices. *Ind. Hyg. and Occ. Med.*, 7 (3), (221-233).
- WYNDHAM C.H., Mac PHERSON R.K., MUNRO A. (1964). Reactions to heat of aborigenes and caucasians. *J. Appl. Physiol.*, 19, (1055-1068).

WYNDHAM, C.H., STRYDOM N.B., MORRISON J.F., WILLIAMS C.G., BREDELL G.A.G., MARITZ J.S., MUNRO A. (1965). Criteria for physiological limits for work in heat. J. Appl. Physiol. 20 (1), (37-45).

WYNDHAM C.H., STRYDOM N.B., MORRISON J.F., BREDELL G.A.G., VAN GRAAN C.H. (1966). A test of the effectiveness of acclimatization procedures in the gold mining industry. J. Appl. Physiol., 21 (1586-1588).

YAGLOU. (1927). Temperature humidity and air movement in industries : The effective temperature index. J. Ind. Hyg., 9, (297-309).

YAGLOU, MINARD D. (1957). Control of heat casualties at military training center. Arch. Ind. Health, 16 (302-316).

A N N E X E I

1 - POSTES ETUDIES

1.1 - Poste d'égaliseur

Il s'agit du travail d'égalisation de la présure dans une fromagerie industrielle. Le poste se situe le long d'un tapis d'une longueur de 20 mètres qui déplace des moules de fromage sur lesquels est placé un tamis qui contient la présure. L'ensemble moules-tamis mesure 1,2 mètre de long. La hauteur de travail est de 1,2 mètre par rapport au sol. Le défilement continu du tapis impose le rythme de travail de l'égaliseur dont les déplacements sont peu nombreux. Par contre, le travail des membres supérieurs est important et se décompose en deux activités :

- l'une est continue et consiste, avec l'aide d'une raclette tenue d'une seule main, à remuer la présure pour accélérer son égouttage et ainsi permettre le passage complet de la présure du tamis dans les moules,
- l'autre est discontinue ; lorsque les tamis sont vides l'égaliseur les enlève des moules et doit les suspendre à des crochets situés sur un rail qui permet de ramener les tamis vers une laveuse automatique. Cette opération ne comporte pas de déplacements de l'opérateur mais un soulèvement d'une charge de 7 - 8 kg de 1,2 à 1,6 mètre avec parfois maintien à cette hauteur car l'accrochage n'est pas immédiat. La fréquence de ce geste est de 4-6 fois par minute.

Les mesures à ce poste ont été réalisées au cours du mois de mai 1984. Les caractéristiques des salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 1.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	19	70	178	1,88
2	35	72	180	1,91
3	22	60	170	1,70
4	37	69	164	1,76
5	21	62	170	1,72

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste d'égaliseur

1.2 - Poste de laveur

Situé dans la même entreprise que l'égaliseur, le travail du laveur consiste à rassembler les moules à fromage sur un plateau en aluminium dans un atelier de "retournement" et de les transporter à l'aide d'un transpalette jusqu'à une machine à laver industrielle dans laquelle il charge tous les éléments. Deux tâches principales peuvent donc être décrites :

- déplacements et traction d'un transpalette dont le poids n'excède pas 100 kg sur des distances de 5 à 30 mètres,
- transbordement des ensembles moules-plateau (7 - 9 kg) depuis la palette dans la machine. Ceci peut s'accompagner de mouvements importants du corps, rotation du tronc car le salarié est face à la machine et le transpalette derrière lui, mais aussi flexion du tronc pour aller chercher les derniers moules sur la palette.

Le poste de laveur a été étudié au cours du mois de mai 1984. Les caractéristiques physiques des salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 2.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	50	67	160	1,70
2	38	72	172	1,85
3	19	65	172	1,77
4	32	62	186	1,84
5	25	58	162	1,62

Tableau 2 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste de laveur

1.3 - Poste de boulanger

L'activité à ce poste de travail consiste à surveiller le bon fonctionnement d'un four de cuisson de bretzels, maintenir une température de cuisson très précise dont le contrôle exige des déplacements continuels le long, et parfois sur, des fours de 10 mètres de long. D'autre part, quatre à cinq fois par heure, le boulanger doit réapprovisionner son four en pâte. Il est ainsi amené à transporter des boules de pâte de 10 à 20 kg. L'activité physique à ce poste peut être classée "légère", elle comporte surtout des déplacements.

Les mesures à ce poste ont été réalisées du 4 au 7 juin 1984. Les caractéristiques physiques des boulangers qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 3.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	22	62	187	1,85
2	23	79	163	1,85
3	39	96	185	2,21
4	42	87	179	2,07
5	44	77	170	1,89

Tableau 3 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste de boulanger

1.4 - Poste de couleur de produits réfractaires

Les pièces réfractaires, principalement des supports de cuisson, sont fabriquées à partir d'un ciment très liquide coulé dans des moules en plâtre. Après une phase de séchage dans le moule (absorption de l'eau du ciment dans le plâtre) les moules sont démontés et les supports réfractaires amenés à la cuisson. Les phases de travail successives sont : le remontage du moule après séchage, la coulée du ciment réfractaire et le démontage des moules. Toutes ces activités comportent une part importante de manutention, principalement manuelle, du fait de la spécialisation de l'entreprise dans les petits supports de cuisson. Les poids des objets manutentionnés sont peu importants : 2 à 4 kg pour les pièces (moules et supports) et de 15 à 20 kg pour les seaux de ciment portés durant les coulées, mais les manipulations sont très nombreuses.

Les mesures à ce poste ont été réalisées du 18 au 22 juin 1984. Les caractéristiques physiques des salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 4.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	39	70	162	1,75
2	34	78	177	1,96
3	25	58	174	1,70
4	52	53	160	1,54
5	32	70	180	1,89

Tableau 4 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste couleur de réfractaires

1.5 - Poste de couleur cuvette

La technologie du réfractaire dans cette entreprise ressemble, du moins pour ce qui nous concerne, à celle vue précédemment pour le poste de couleur de réfractaire. Néanmoins les pièces fabriquées ici étant plus lourdes (cuvettes de WC), des systèmes d'aide à la manutention ont été mis en place. La très bonne adéquation de ces systèmes et le fait que la coulée soit automatique réduisent de façon importante la charge physique.

Les mesures à ce poste ont été réalisées du 25 au 29 juin 1984. Les caractéristiques physiques des salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 5.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	28	60	170	1,70
2	31	89	178	2,08
3	36	69	166	1,77
4	36	58	164	1,63
5	34	80	173	1,94

Tableau 5 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste couleur cuvette

1.6 - Poste de machiniste (machine IS 44)

La fabrication de bouteilles de verre est réalisée à ce poste sur une machine en ligne à triples gobbes (moule). Le verre en fusion, en provenance du four, arrive sur le haut de la machine où il est automatiquement sectionné en gouttes de verre donc chacune remplit un moule. L'injection d'air sous pression colle le verre à la paroi du moule qui après un mouvement de retournement s'ouvre et dépose la bouteille sur un tapis transporteur en amiante. Ce dernier passe devant toute la face avant de la machine et ramasse les 3 bouteilles des 12 ensembles de gobbes pour les transporter jusqu'à l'aire de conditionnement. Le machiniste doit surveiller le bon déroulement des opérations. Il faut qu'à tout moment il soit prêt à intervenir sachant que tout incident non récupéré en quelques secondes aboutit à un amoncellement de verre fondu qu'il est alors difficile de dégager.

L'activité physique du machiniste en cycle normal est très légère : graissage régulier des moules, parfois changement de moules. Mais les incidents, dont la fréquence est très variable selon le poste, ont pour conséquence une augmentation importante et en général brève de l'activité physique.

Les mesures à ce poste ont été réalisées du 2 au 6 juillet 1984. Les caractéristiques physiques des 5 salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 6.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	37	57	170	1,66
2	39	93	174	2,08
3	42	91	173	2,05
4	31	60	173	1,72
5	38	73	172	1,86

Tableau 6 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste de machiniste

1.7 - Poste de lamineur

L'obtention de profilés en fonte impose un laminage des cubillots qui sont la forme de départ du métal. Selon la forme du produit fini les passages dans des filières de laminage seront plus ou moins nombreux. Dans la situation étudiée le produit fini, de forme variée, est toujours très fin. Si les passages dans les premiers tambours peuvent être automatisés de façon assez simple, les trois dernières phases ne peuvent plus l'être car l'automatisation ne peut être réglée que pour un profilé standard alors que les produits manufacturés au poste considéré sont très variables. De ce fait le passage du profilé des tambours 4-5 et 5-6 est toujours manuel et c'est la situation du dernier lamineur qui a été étudiée. Son travail consiste à attraper avec une pince le profilé et à l'introduire dans le dernier tambour. Deux situations se présentent : le profilé sortant du tambour 5 doit être pris dès sa sortie du tambour et introduit dans le suivant grâce à un demi-tour du lamineur pour accompagner la rotation du profilé ; l'autre situation est celle où le profilé n'est pas saisi dès sa sortie du tambour mais se dévide sur toute sa longueur puis est saisi, toujours grâce à une pince, à son extrémité, qui est introduite dans le dernier tambour. La deuxième situation est à peine moins dure que la première. Le travail physique à ce poste est dur ; ceci explique que pour chaque période de travail de 30 minutes les salariés bénéficient de 30 minutes de repos.

Les mesures à ce poste ont été effectuées du 10 au 13 juillet 1984. Les caractéristiques physiques des 5 salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 7.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	42	56	168	1,64
2	35	75	159	1,74
3	26	74	168	1,84
4	36	73	173	1,87
5	32	90	180	2,10

Tableau 7 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste de lamineur

1.8 - Poste de trempeur

La fabrication de roulements, à billes ou à tambours, requiert l'utilisation de matériaux très durs qui sont obtenus par des méthodes de trempage. Ce poste est situé à la sortie d'un four qui permet de chauffer les pièces qui sont sorties manuellement du four à l'aide d'un crochet puis le salarié positionne la pièce dans un cadre où elle est noyée dans un bain d'huile en même temps que sa forme est contrôlée. Cette activité alterne avec celle d'approvisionnement du four qui implique une charge physique un peu plus importante, déplacements de transpalettes et remplissage, avec des pièces sortant de fabrication, du tapis qui entre dans le four. L'activité physique à ce poste est moyenne, l'exposition au rayonnement du four est localisée à la partie supérieure du corps et en particulier au thorax.

Les mesures à ce poste ont été réalisées du 27 au 31 août 1984. Les caractéristiques physiques des 5 salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 8.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	36	70	167	1,79
2	38	69	165	1,76
3	31	73	174	1,88
4	30	63	173	1,76
5	31	72	168	1,82

Tableau 8 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste de trempe sur montage

1.9 - Poste de soudeur (fond de générateur de vapeur)

La fabrication de certains éléments de grosse métallurgie, centrales nucléaires en l'occurrence, est très automatisée. Cependant certaines tâches ne le sont pas et en particulier les finitions de soudure. C'est un poste de couverture de raccords inconel-aluminium situé à l'intérieur d'un générateur de vapeur qui a été étudié. Cette situation présente la particularité d'être dans un espace extrêmement réduit dont les parois sont, pour des raisons techniques, chauffées de l'extérieur à une température de 180°C. Du fait de la ventilation très importante dans l'enceinte de travail la température des parois à l'intérieur est approximativement de 50 à 55°C. Le soudeur est assis en tailleur sur un petit support qui l'isole de la paroi et soude devant lui en adoptant une position très penchée en avant. La durée de travail dans le générateur de vapeur est laissée à l'appréciation du soudeur ; en général, elle est de 15 à 30 minutes. Entre les opérations de soudage le salarié récupère dans l'atelier où règnent des conditions thermiques de neutralité.

Les mesures à ce poste ont été réalisées les 29-30 mai et 27-28 juin 1985. Les caractéristiques physiques des 5 salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 9.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	30	65	175	1,80
2	32	64	165	1,71
3	27	72	165	1,80
4	32	69	178	1,86
5	33	81	175	1,97

Tableau 9 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste de soudeur

1.10 - Poste de tappeur tunnel

Le poste de tappeur tunnel se trouve en fin de chaîne de démoulage de pièces de fonte fabriquées par coulée dans des moules en sable. Bien que les pièces, une fois sorties du châssis qui contient le moule, soient vibrées mécaniquement, le sable qui y adhère et les noyaux (éléments en sable colle qui, ajoutés au moule, permettent de réaliser des évidements dans la pièce finie) ne sont pas toujours complètement éliminés. Le rôle du tappeur tunnel est de surveiller l'état des pièces et au besoin de donner des coups de masse dans la pièce qui passe devant lui suspendue à un rail. Selon les types de pièces fabriquées et le fonctionnement du mécanisme vibrant, l'activité du tappeur tunnel peut être légère ou très dure.

Les mesures à ce poste ont été réalisées les 25-26 juin et 1-2-3 juillet 1985. Les caractéristiques physiques des salariés qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 10.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	47	83	170	1,95
2	40	75	178	1,93
3	38	78	172	1,92
4	41	80	178	1,99
5	22	65	170	1,76

Tableau 10 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste de tappeur tunnel

1.11 - Situation expérimentale en cellule chaude

Cette situation a été retenue car elle permettait des mesures dans des conditions à forte contrainte radiante. L'activité physique dans l'enceinte chaude consistait à déplacer sur une tablette une petite caisse avec poignées à la fréquence de 15 fois par minute. Les sujets restaient debout dans la cellule chaude pendant 4 séquences de 30 minutes chacune. Entre chaque séquence ils restaient au repos assis devant la cellule chaude dans une ambiance de neutralité thermique. Les expériences ont eu lieu les 19-20 et 21 mars 1986.

Les caractéristiques physiques de sujets d'expérience sont reportées dans le tableau 11. Les sujets n'étaient pas acclimatés à la chaleur, ils avaient été exposés à des ambiances équivalentes à deux reprises pendant une heure dans la quinzaine précédant l'expérience. Ils étaient cependant très entraînés physiquement.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	19	82	182	2,04
2	21	65	176	1,80
3	19	72	182	1,93
4	20	70	176	1,86
5	21	82	191	2,11

Tableau 11: Caractéristiques physiques des cinq sujets ayant participé à l'expérimentation en cellule chaude.

1.12 - Poste de mineur

Le poste de mineur de pied de silo se trouve en bout d'exploitation dans la zone du puit d'extraction de la potasse. Le minerai remonte par le puits qui sert également à la sortie de l'air en bout du circuit de ventilation. Il s'agit donc de l'une des zones les plus chaudes du fond à une profondeur de 850 mètres. Le travail du mineur consiste à entretenir et surveiller le réseau de convoyeurs à bande qui centralisent vers des silos la potasse venant des différents chantiers. Les silos servent de régulateurs avant le chargement des "SKIPS" (ascenseurs qui servent à la montée du minerai) qui remontent la potasse à la surface. A ce poste les différentes tâches du mineur sont d'une part le nettoyage du chantier, activité physique assez légère, et d'autre part d'assurer un alignement des convoyeurs. Cette dernière activité a pour conséquence une charge physique, souvent très dure, et est assez fréquente du fait des mouvements géologiques continuels qui touchent les planchers des galeries.

Les mesures à ce poste ont été réalisées du 18 au 25 juin 1985. Les caractéristiques physiques des sujets qui ont participé à l'étude sont reportées dans le tableau 12.

Sujet	Age (années)	Poids (kg)	Taille (cm)	Surface cutanée (m ²)
1	30	80	170	1,92
2	22	74	173	1,88
3	30	68	172	1,81
4	34	83	180	2,03
5	28	63	179	1,80

Tableau 12 : Caractéristiques physiques des cinq salariés du poste de mineur

A N N E X E II

1 - RESULTATS PAR POSTE

1.1 - Présentation des résultats

L'annexe II présente les résultats des douze postes qui ont été analysés au cours de cette étude. Une présentation identique est adoptée pour rendre compte des résultats des mesures et des calculs des indices pour les 12 postes de travail. Cette présentation est détaillée dans la première partie de cette annexe et comporte pour chaque poste cinq paragraphes :

- la contrainte thermique,
- l'astreinte thermique,
- l'évolution de la contrainte durant les 4 heures d'observation,
- la comparaison des astreintes observées et des contraintes calculées par les différents indices et enfin,
- un court commentaire relatif à la situation thermique au poste étudié.

Les explications données en introduction ne sont pas reprises lors de la présentation des résultats de chaque poste.

1.1.1 - Contrainte thermique

La contrainte thermique est présentée sous forme d'histogrammes pour chacune des variables physiques (t_a , PaH_2O , V_a et $\bar{T}_r$). Les classes des histogrammes ont une largeur de 3°C pour t_a , de 0,3 kPa pour PaH_2O , de 0,3 m.s⁻¹ pour V_a et de 10°C pour $\bar{T}_r$. Le niveau d'une classe, pour tous les paramètres de la contrainte, est exprimé en pourcentage du temps total de mesure, en général 20 heures, durant lequel les salariés ont été exposés à des valeurs du paramètre appartenant à cette classe.

1.1.2 - Astreinte thermique

L'astreinte thermique est présentée dans un tableau qui regroupe les résultats des mesures physiologiques par salarié sur l'ensemble de la période de mesure, les moyennes interindividuelles sur 5 salariés et les écarts-type (σ) :

- de la sudation mesurée, exprimée en grammes par heure,
- des variations de fréquence cardiaque de repos (DFc) et de température buccale (Dt_{bu}) entre le début et la fin de la période de mesure,
- de la dépense énergétique en W.m⁻².

La sudation mesurée est également présentée sous forme d'histogramme dont chaque classe a une largeur de 100 g.h⁻¹. Le niveau de chaque classe est le pourcentage du temps total, en général 20 heures, durant lequel les salariés ont eu un débit sudoral correspondant à la classe considérée.

1.1.3 - Evolution de la contrainte thermique

L'évolution de la contrainte thermique au cours des périodes de mesure est un aspect important de la charge de chaleur. Elle montre les niveaux et les fréquences des fluctuations des ambiances thermiques. Ainsi une figure présente l'évolution dans le temps des résultats obtenus avec deux méthodes d'estimation de la charge thermique : d'une part l'indice WBGT et d'autre part l'indice Sudation Requise (ISO). Dix graphiques représentent les valeurs dans

le temps de ces deux indices pour les cinq salariés de chaque poste de travail. Afin d'être plus lisibles, les graphiques ont été tracés après qu'un lissage par moyenne mobile ait été appliqué aux résultats minute par minute. La fenêtre de moyennage était de 13 minutes. Les fluctuations des grandeurs physiques thermiques sont exprimées par les durées moyenne et maximale d'exposition à une ambiance stable. Les moyennes interindividuelles de ces durées sont indiquées pour chaque poste de travail. Les zones décrites en 2.3.1.1 ont été regroupées afin de ne tenir compte que de variations significatives des paramètres physiques. Ainsi pour le calcul des durées d'exposition à une ambiance "stable", n'étaient considérées comme modification d'ambiance que les variations de l'un des paramètres au-delà des seuils suivants : 4°C pour t_a , 7°C pour t_r , 0,5 m.s⁻¹ et 0,4 kPa pour P_aH_2O .

1.1.4 - Tableau comparatif des contraintes calculées à l'astreinte sudorale mesurée

La comparaison des résultats calculés des indices de contrainte ou d'astreinte thermique à l'astreinte sudorale observée est faite, pour chaque poste, à l'aide d'un tableau. Celui-ci inclut les résultats obtenus pour chaque indice, selon ses 2 ou 3 formes de calcul (cf. 2.4) et l'astreinte observée. Toutes les valeurs sont exprimées en % comme expliqué au paragraphe 2.5. L'astreinte sudorale mesurée est présentée en haut du tableau. Deux colonnes présentent les résultats des indices selon la méthode séquence par séquence notée seq/seq (colonne de gauche) et pondérée qui tient compte des 10 minutes d'exposition qui précèdent le temps t de mesure, notée expo (colonne de droite). Pour l'indice Sudation Requisite trois résultats sont exposés :

- la méthode proposée par l'ISO (ISO/DIS 7933) et l'AFNOR (X 35-204) notée ISO,
- une méthode qui n'introduit que la pondération dans le temps notée ISOexpo,
- la dernière qui, en plus de la pondération dans le temps, calcule la température cutanée moyenne et tient compte de la modification de la formule de calcul du rendement évaporatoire de la sudation, notée ISOmod (cf. 2.4).

1.1.5 - Commentaire

Un commentaire très court fait suite aux résultats de chaque poste et ne peut être considéré que comme la conclusion d'une étude ponctuelle d'un poste de travail. Une analyse des conditions thermiques aux postes étudiés devrait, pour être complète, tenir compte des répercussions des paramètres climatiques extérieurs sur les conditions thermiques au poste de travail. Ceci n'était pas l'objet de la présente étude.

1.2 - Résultats par poste

1.2.1 - Poste d'égaliseur (fromagerie industrielle)

Contrainte thermique

Les valeurs des paramètres physiques de l'ambiance sont présentées à la figure 1.

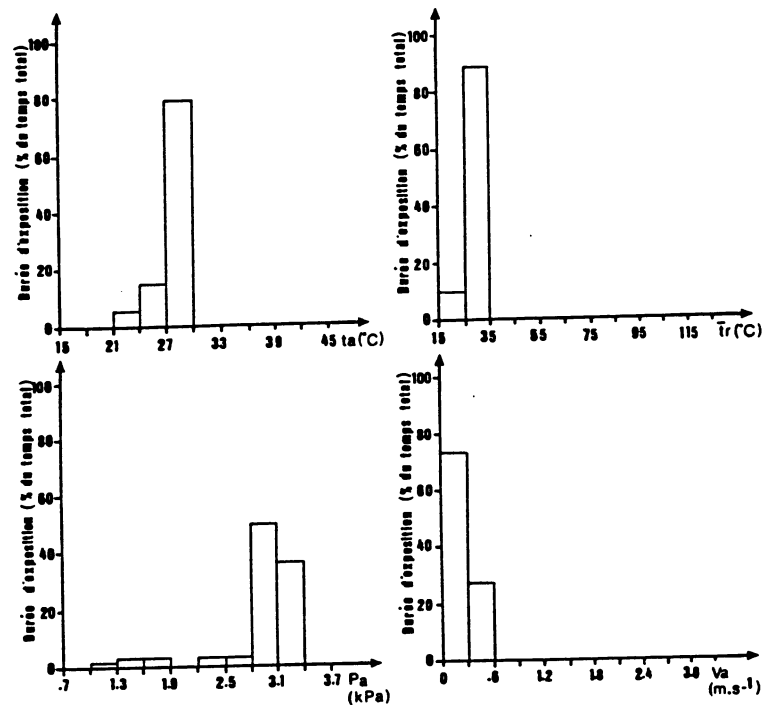


Figure 1 : Histogrammes des paramètres physiques caractéristiques de l'ambiance thermique au poste d'égaliseur (cf. 1.1.1).

Les résultats des mesures présentés dans la figure 1 montrent que le niveau de la contrainte est modéré. Cependant la pression partielle de vapeur d'eau est assez élevée. Aussi, compte tenu de la t_a modérée, l'humidité relative est importante.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 1.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	286	+ 0,7	+ 10	169	12
2	182	+ 1,0	+ 14	140	25
3	259	+ 0,3	+ 9	157	12
4	163	+ 0,5	+ 2	153	17
5	183	+ 0,4	+ 7	171	14
Moyenne	214,6	+ 0,6	+ 8,4	158,0	
σ	48,6	0,2	3,9	11,3	

Tableau 1 : Résultats des mesures physiologiques : moyennes interindividuelles (calculées sur 5 salariés) et écart-type (σ)

Les résultats des mesures physiologiques montrent le faible débit sudoral qui confirme, a priori, le fait que la contrainte thermique soit jugée peu importante sur la base des résultats des mesures physiques. Néanmoins l'augmentation de la température buccale est assez importante ($0,6^{\circ}\text{C}$ en moyenne) ; elle pourrait être expliquée par une réduction des possibilités évaporatoires dues à la pression partielle de vapeur d'eau élevée à ce poste. L'histogramme de la figure 2 montre la distribution des débits sudoraux mesurés au cours des différentes phases de travail.

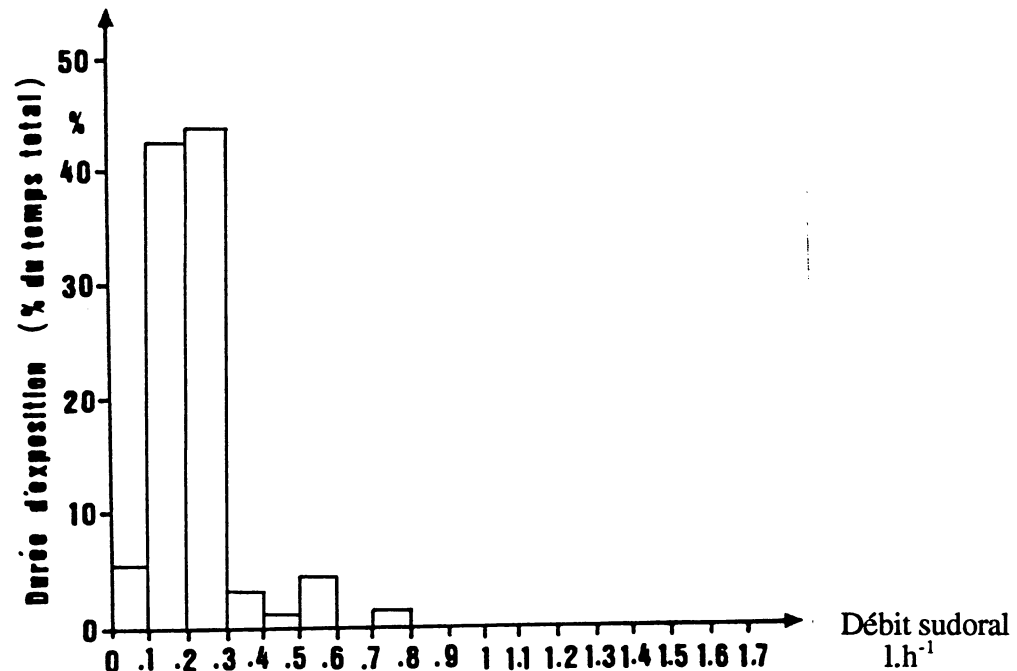


Figure 2 : Distribution des débits sudoraux au poste d'égaliseur (cf. 1.1.2)

Tous les débits sudoraux supérieurs à $0,4 \text{ l.h}^{-1}$ (figure 2) ont été mesurés au cours des pauses prises dans un endroit sec qui permettait l'évaporation de la sueur contenue dans les vêtements. Durant la pause la température buccale revenait à son niveau de début d'exposition. Aussi, les élévations de T_{bu} à ce poste doivent être rapportées à des expositions de 1 h 30 min à 1 h 50 min, durées d'exposition entre deux pauses, et non à 4 heures.

* Evolution de la contrainte

L'évolution sur les 4 heures de mesure, d'un indice de contrainte (WBGT) et d'un indice d'astreinte (Sudation Requisite) est présentée à la figure 3 pour les 5 salariés. La contrainte ainsi que l'astreinte sont, comme le montre la figure 3 très constantes à ce poste. La réduction de la charge thermique en milieu de poste est le fait de la pause dans un endroit frais et à faible pression partielle de vapeur d'eau.

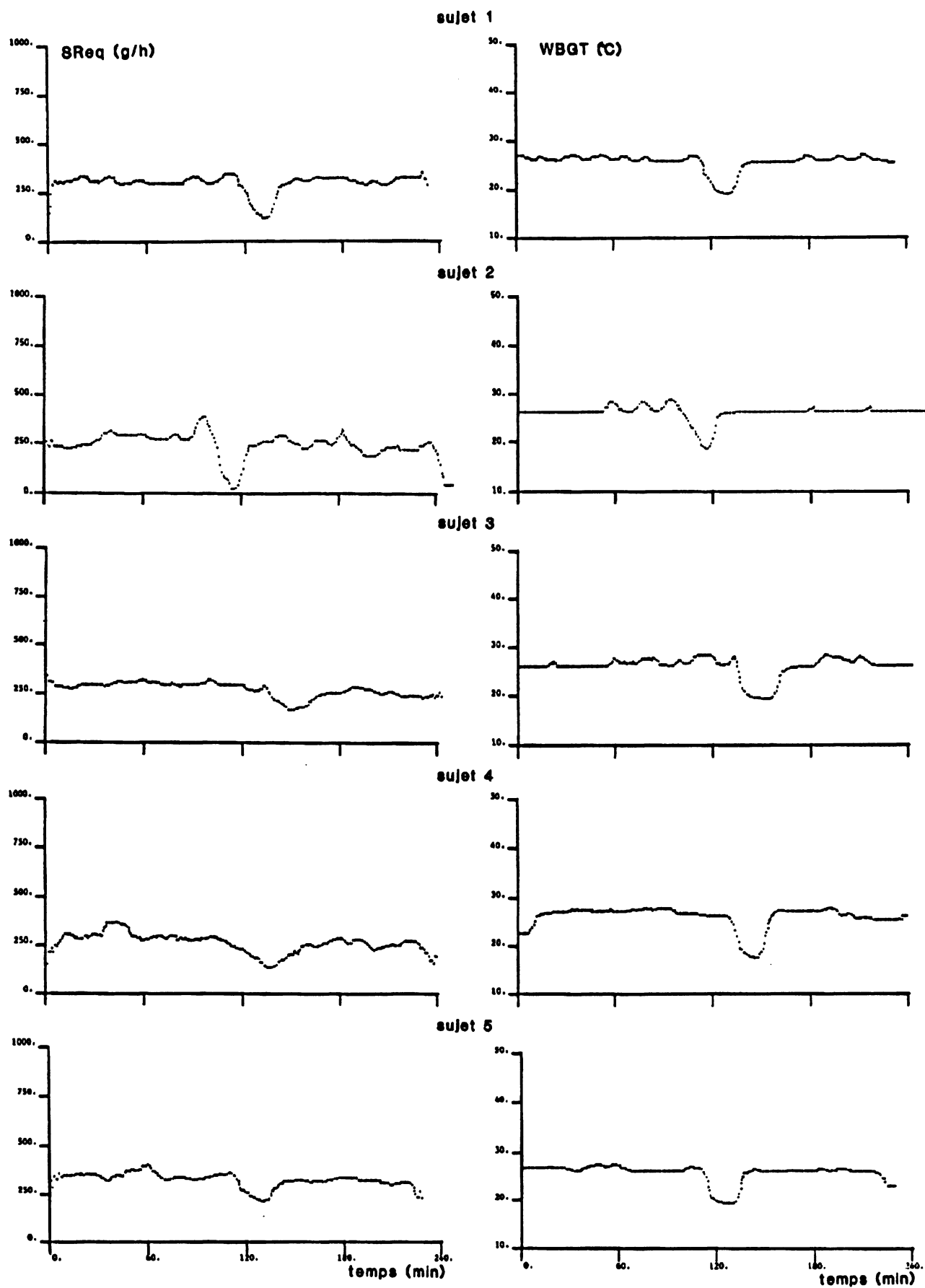


Figure 3 : Evolution en fonction du temps d'exposition des indices WBGT (à droite) et Sudation Requise (à gauche) pour les 5 égaliseurs

Les moyennes interindividuelles des durées d'exposition moyenne et maximale à une ambiance stable sont respectivement de 43 min ($\sigma = 20$ min) et 118 min ($\sigma = 18$ min).

* Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée

Les valeurs des différents indices calculés et de l'astreinte sudorale au poste d'égaliseur sont présentées au tableau 2. Pour l'astreinte comme pour les indices, la moyenne interindividuelle des résultats des 5 salariés après 4 heures d'observation est indiquée (1.1.4).

Astreinte mesurée : 28,6 %			
Indices	Calcul	ség/ség	Expo
Sudreq	ISO	37,6	ISOexpo 36,2 ISOmod 77,6
ITS		47,2	44,0
HSI		156,0	142,6
P4SR		61,6	60,0
WBGT		79,0	76,2
PPD		84,8	82,0
Teq		110,0	104,4
ET		67,6	65,0
ET*		57,8	55,8

Tableau 2 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des indices de contrainte et d'astreinte thermiques (sous leurs différentes techniques de calcul) et de la sudation mesurée (cf. 3.1.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %.

Dans cette condition à forte contrainte humide les indices ne permettent pas de prévoir avec précision l'astreinte sudorale. L'indice Sudation Requise (ISO) donne une valeur approchée de l'astreinte. Mais ceci est dû au débit sudoral élevé au moment de la pause qui rattrape la sous-estimation de la sudation observée au cours du travail.

* Commentaire

Pour les conditions climatiques, autant dans l'atelier qu'à l'extérieur (paramètres météorologiques moyens mesurés durant les 20 heures d'observation : $t_a = 13,5^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,04 \text{ kPa}$, $V_a = 1,2 \text{ m.s}^{-1}$, et un ensoleillement de $227,7 \text{ W.m}^{-2}$), et pour l'activité et la durée de travail observées la contrainte thermique à ce poste n'est pas excessive.

1.2.2 - Poste de laveur (fromagerie industrielle)

Contrainte thermique

La figure 4 présente, sous forme d'histogramme, la distribution des valeurs mesurées des quatre paramètres physiques caractéristiques de la contrainte thermique de laveur.

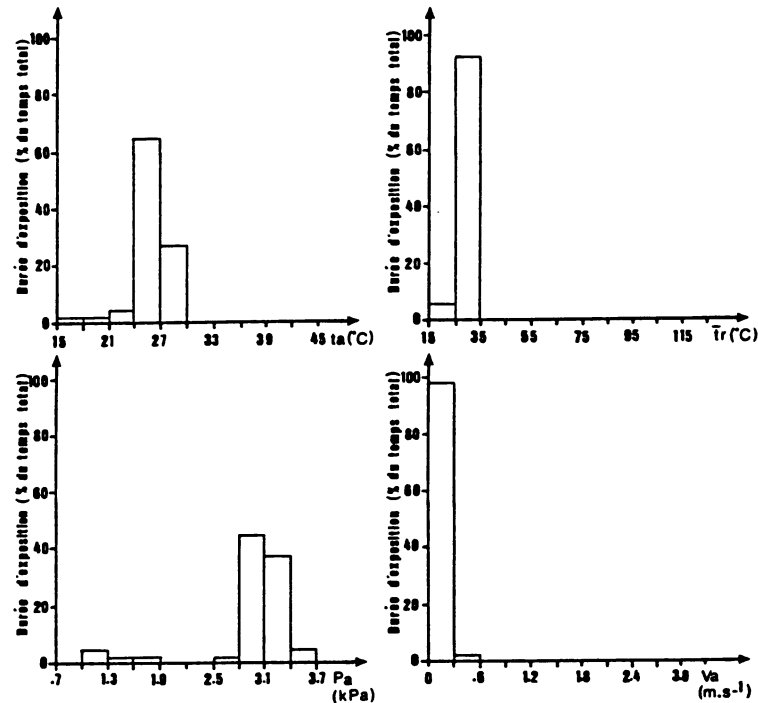


Figure 4 : Histogrammes des valeurs mesurées des paramètres physiques de la contrainte thermique au poste de laveur (cf. 2.1)

Les valeurs mesurées présentées à la figure 4 montrent la similitude entre la contrainte aux postes de laveur et d'égaliseur vu précédemment. Cependant le poste de laveur présente une contrainte convective sensiblement plus faible que le poste d'égaliseur.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés au tableau 3.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	382	+ 0,6	+ 7	134	24
2	331	+ 0,2	- 2	160	17
3	188	+ 0,4	+ 20	152	19
4	211	+ 0,8	+ 15	119	32
5	176	+ 0,2	+ 12	144	35
Moyenne	257,6	+ 0,44	+ 10,4	141,8	
σ	83,1	0,23	7,5	14,3	

Tableau 3 : Résultats des mesures physiologiques : moyennes interindividuelles et écart-types (σ)

Comme pour le poste d'égaliseur les niveaux d'astreinte sudorale sont faibles, néanmoins l'augmentation de la température buccale est ici encore sensible, bien que plus réduite que pour le poste précédent. La distribution des débits sudoraux observés est présentée à la figure 5.

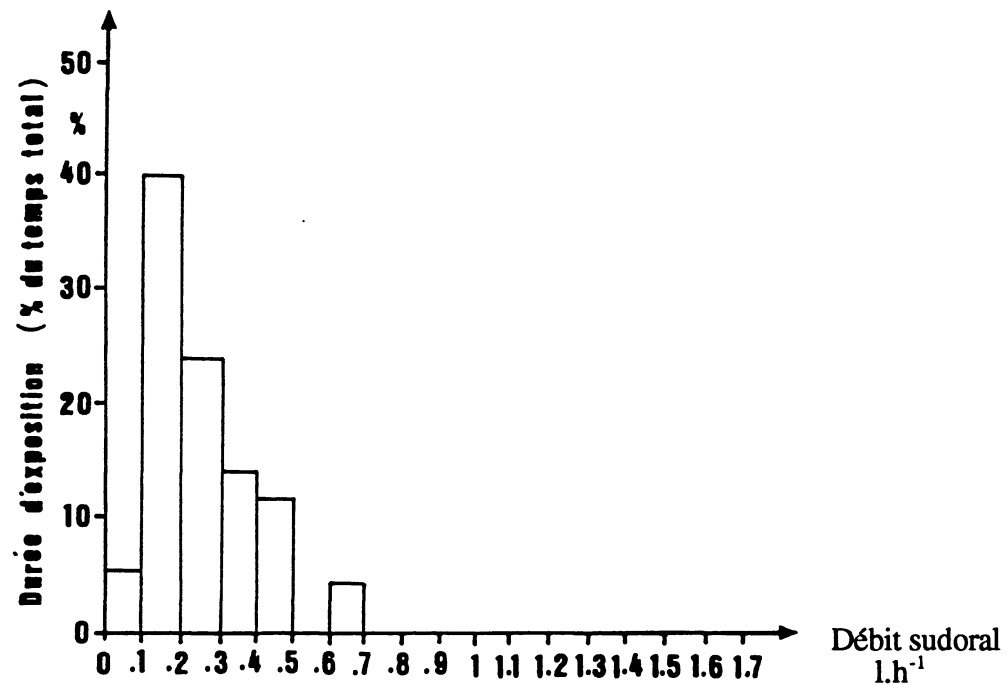


Figure 5 : Distribution des débits sudoraux mesurés au poste de laveur (cf. 1.1.2)

*** Evolution de la contrainte**

L'évolution, durant les 4 heures de mesure, et pour chaque salarié, d'un indice de contrainte (WBGT) et d'un indice d'astreinte (Sudation Requisite) est présentée à la figure 6. Celle-ci montre la constance de la contrainte et la variabilité de l'astreinte due à des niveaux d'activité musculaires variés.

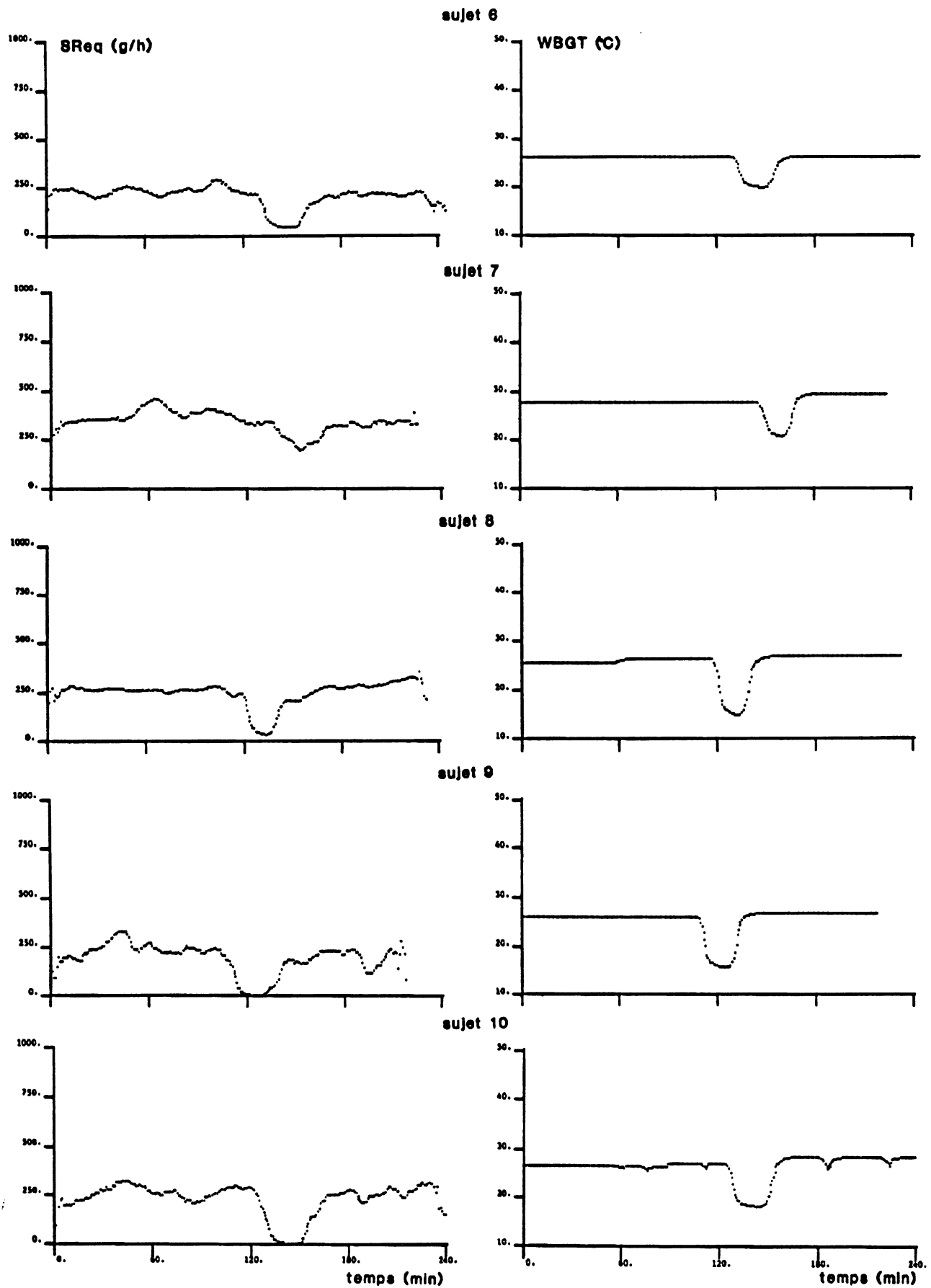


Figure 6 : Evolution en fonction du temps des indices WBGT (à droite) et Sudation Requise (à gauche) au poste de laveur

Les moyennes interindividuelles des durées d'exposition moyenne et maximale à une ambiance stable sont respectivement de 39 min ($\sigma = 15$ min) et 115 min ($\sigma = 33$ min).

*** Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée**

La comparaison des résultats des différents indices calculés au résultat de l'astreinte sudorale observée est rapportée dans le tableau 4.

Astreinte mesurée : 34,3 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	33	ISOexpo 31,6 ISOmod 70,6
ITS		45,2	41,4
HSI		173,4	157,6
P4SR		60,6	57,6
WBGT		75,0	71,6
PPD		78,2	72,8
Teq		112,0	106,0
ET		61,6	58,8
ET*		52,8	49,6

Tableau 4 : Moyennes interindividuelles calculées sur 5 salariés des indices et l'astreinte observée. Les résultats des indices sont présentés pour les différents modes de calculs (cf. 2.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %.

Dans cette condition à forte contrainte humide, les indices ne permettent pas de prévoir le niveau de l'astreinte observée. L'indice Sudation Requise (ISO) donne les résultats les plus proches de l'astreinte. Mais, comme pour le poste précédent, les débits sudoraux très élevés au moment des pauses corrigent la surestimation de la sudation réelle que font les indices au cours du travail.

*** Commentaire**

Dans les conditions thermiques autant dans l'atelier qu'à l'extérieur (mesures météorologiques durant les investigations au poste de laveur : $t_a = 16,1^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,04$ kPa, $V_a = 1,58 \text{ m.s}^{-1}$, ensoleillement = $320,6 \text{ W.m}^{-2}$), et pour les durées et l'intensité de travail observées, la contrainte thermique à ce poste n'est pas excessive.

1.2.3 - Poste de boulanger

Contrainte thermique

La figure 7 présente la distribution des valeurs des 4 paramètres physiques de la contrainte thermique au poste de boulanger.

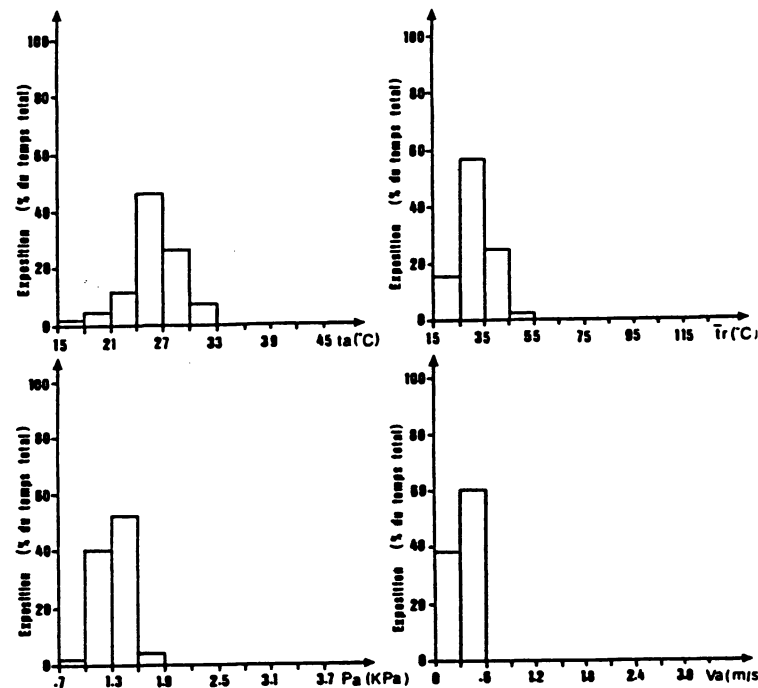


Figure 7 : Histogrammes des valeurs des paramètres physiques de l'ambiance thermique au poste de boulanger

Les résultats de la figure 7 mettent en évidence le faible niveau de la contrainte thermique à ce poste.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 5.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	160	0,3	+ 15	101	23
2	309	0,2	+ 6	129	33
3	256	- 0,1	- 8	101	30
4	229	0	- 5	119	18
5	195	0,3	+ 2	134	23
Moyenne	229,8	0,1	2,0	116,8	
σ	51,1	0,2	8,2	13,8	

Tableau 5 : Résultats des mesures physiologiques moyennes et interindividuelles et écart-types calculés (σ)

Les résultats présentés au tableau 5 confirment le faible niveau de la contrainte thermique à ce poste. En effet, les astreintes sudorales, thermostatiques et circulatoires sont faibles ou nulles pour les cinq salariés de ce poste. La distribution des débits sudoraux mesurés au poste de boulanger est représentée à la figure 8.

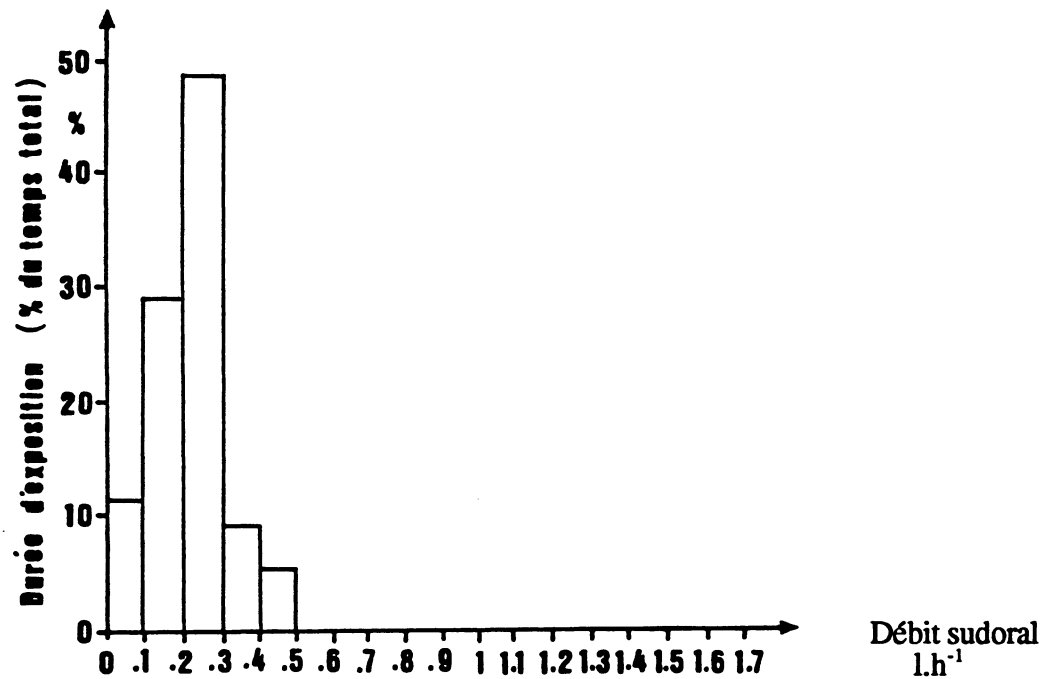


Figure 8 : Histogramme de la distribution des débits sudoraux mesurés au poste de boulanger

* Evolution de la contrainte

L'évolution au cours du temps de la contrainte et de l'astreinte calculées est présentée à la figure 9.

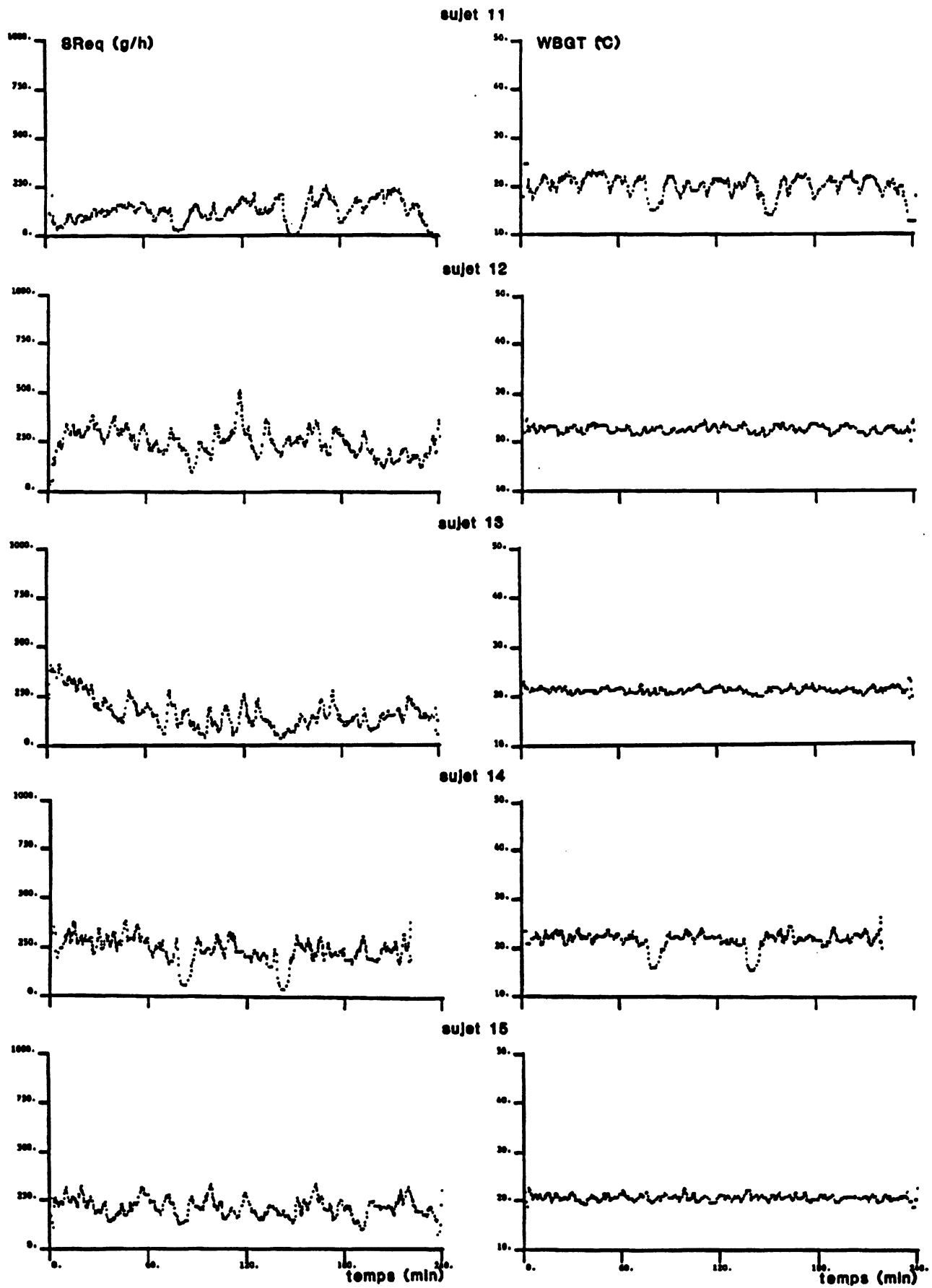


Figure 9 : Evolution en fonction du temps des indices WBGT (à droite) et Sudation Requise (à gauche) pour les 5 boulangers

Les conditions hygrothermiques à ce poste sont très fluctuantes ainsi les moyennes interindividuelles des durées d'exposition moyenne et maximale à une ambiance stable sont respectivement de 1 min et 10 s. ($\sigma = 20$ s.) et 6 min et 50 s. ($\sigma = 1$ min et 20 s.).

* Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée

Les valeurs de l'astreinte sudorale observée et des résultats des indices calculés sont reportées au tableau 6. Toutes les valeurs sont exprimées en %.

Astreinte mesurée : 30,6 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	25,4	ISOexpo 23,8
			ISOmod 33,4
ITS		28,8	25,2
HSI		64,2	54,4
P4SR		40,2	35,6
WBGT		31,2	29,8
PPD		51,4	43,2
Teq		25,8	18,2
ET		32,6	32,6
ET*		27,6	27,4

Tableau 6 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices de l'astreinte observée (cf. 1.1.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %.

Dans cette situation les indices, hormis HSI, P4SR et PPD, rendent assez fidèlement compte du niveau de l'astreinte thermique.

* Commentaire

Pour les conditions hygrothermiques mesurées à ce poste et les valeurs des paramètres météorologiques externes (les valeurs moyennes durant les 20 heures de mesure étaient : $t_a = 15,5^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,17$ kPa, $V_a = 1,4$ m.s⁻¹ et un ensoleillement de 259 W.m⁻²) et la dépense énergétique mesurée, la contrainte thermique au poste de boulanger était très légère.

1.2.4 - Poste de couleur de produits réfractaires

Contrainte thermique

La figure 10 présente la distribution des valeurs des paramètres physiques au poste de couleur.

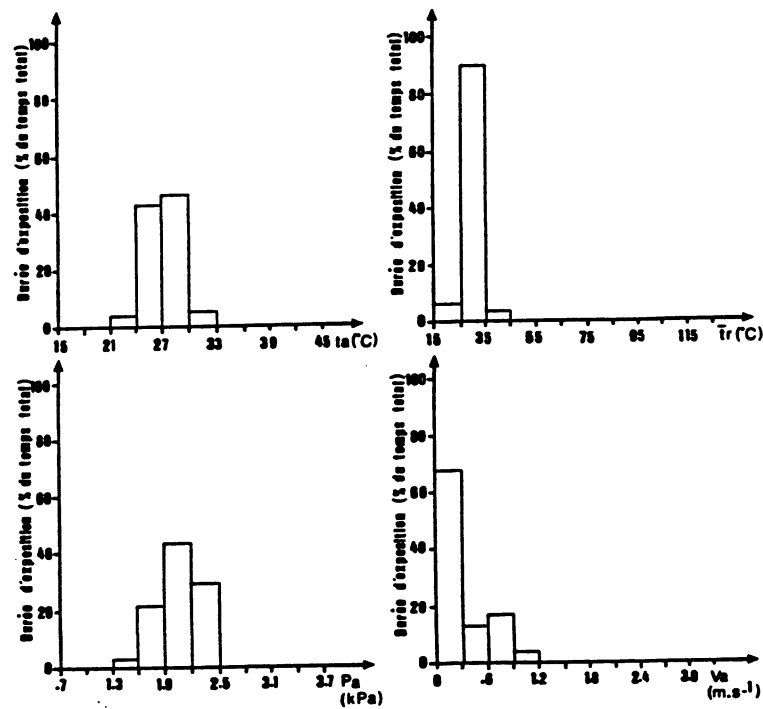


Figure 10 : Histogrammes des valeurs mesurées des paramètres de la contrainte thermique au poste de couleur

Les résultats de la figure 10 montrent que la contrainte thermique est moyenne à ce poste, mais la pression partielle de vapeur d'eau est assez importante à cause du séchage des pièces réfractaires.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	403	+ 0,6	+ 24	169	41
2	449	+ 0,5	- 27	196	44
3	289	+ 0,1	+ 9	173	53
4	300	+ 0,6	+ 16	182	17
5	183	+ 0,4	+ 7	171	56
Moyenne	363,6	0,4	+ 15,2	174,4	
σ	61,0	0,2	11,0	14,5	

Tableau 7 : Résultats des mesures physiologiques au poste de couleur (σ = écart-type)

Les résultats du tableau 7 montrent le niveau important de dépense énergétique à ce poste, celle-ci est le facteur essentiel de la contrainte thermique au poste de couleur.

La distribution des débits sudoraux observés est présentée à la figure 11. Bien que globalement modérés, les débits sont supérieurs à 500 g.h^{-1} durant près de 20 % du temps.

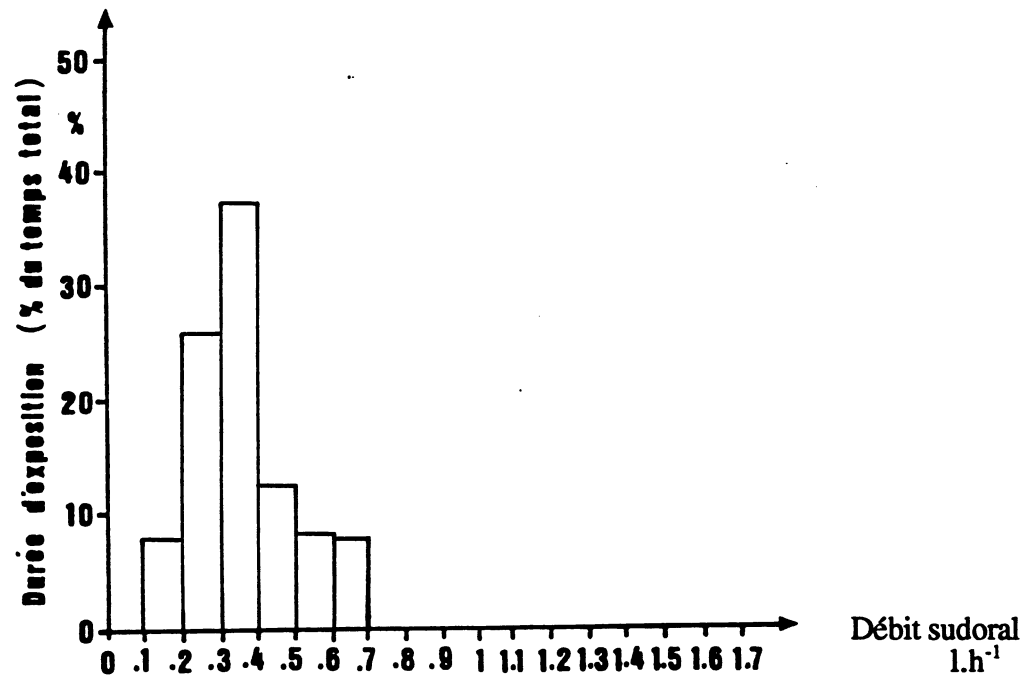


Figure 11: Histogrammes des débits sudoraux au poste de couleur

* Evolution de la contrainte

L'évolution durant les 4 heures de mesures d'un indice de contrainte (WBGT) et d'un indice d'astreinte (Sudation Requisite) est présentée à la figure 12.

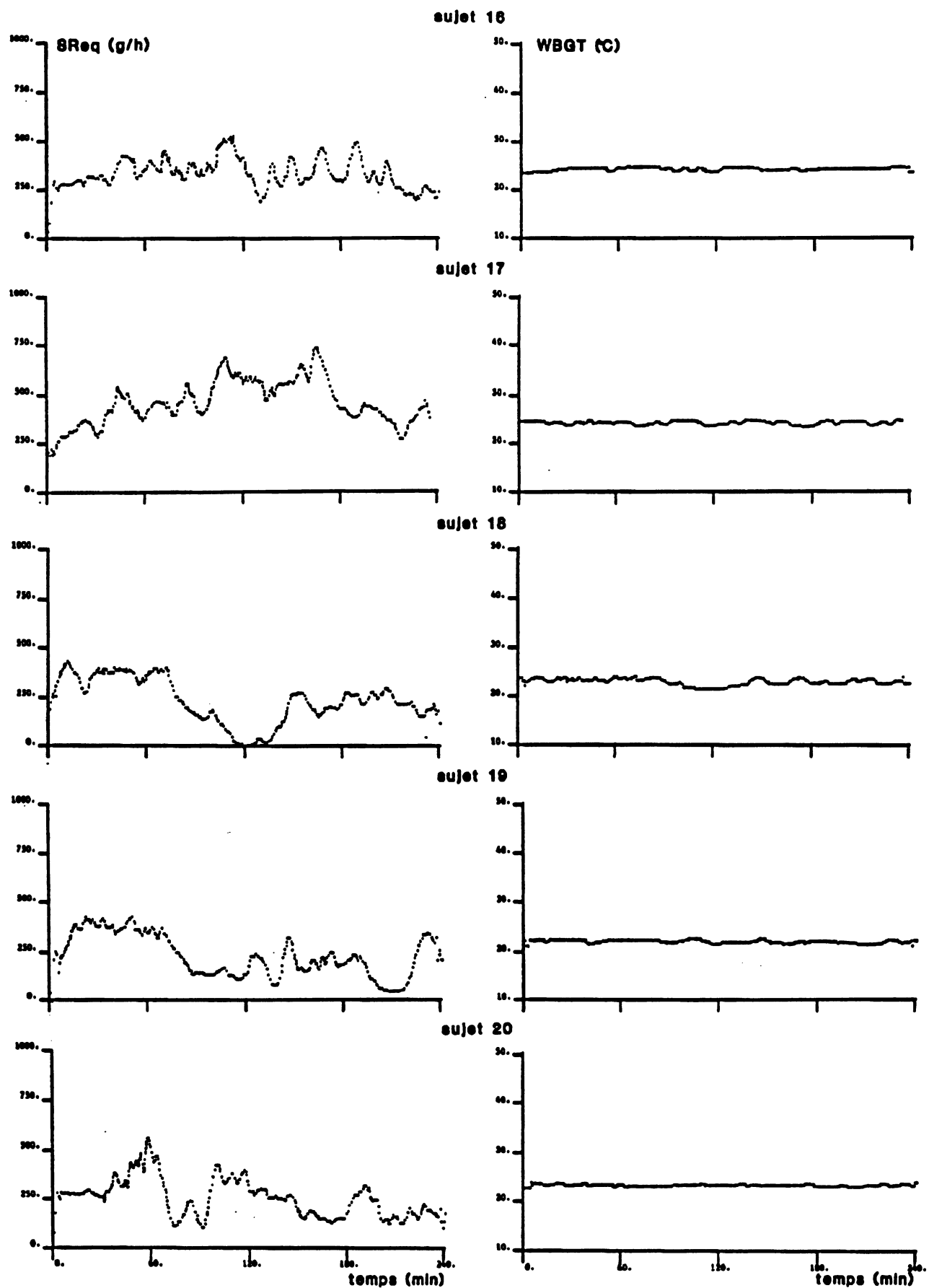


Figure 12 : Evolution au cours du temps de mesure du WBGT (à droite) et de Sudation Requise (à gauche) pour les 5 salariés du poste de couleur

La figure 12 montre que la contrainte (WBGT) à ce poste est stable alors que l'astreinte calculée (Sudation Requête) présente des fluctuations importantes en niveau et ceci du fait des variations de la dépense énergétique. Les moyennes interindividuelles des durées d'exposition moyenne et maximale à une ambiance stable sont respectivement de 56 min et 40 s. ($\sigma = 102$ min) et 85 min et 10 s. ($\sigma = 85$ min). Les écart-types importants de ces durées, s'expliquent par le fait que l'un des salariés n'a pas changé d'ambiance pendant toute la période d'observation.

* Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée

Les résultats des différents indices et de l'astreinte sudorale observée sont présentés dans le tableau 8.

Astreinte mesurée : 48,5 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	40,2	ISOexpo 38,6 ISOmod 59,0
ITS		50,8	46,0
HSI		158,6	130,4
P4SR		64,6	63,0
WBGT		68,6	68,0
PPD		78,6	76,8
Teq		98,4	91,8
ET		61,8	61,4
ET*		48,0	47,8

Tableau 8 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices et de l'astreinte observée (cf. 1.1.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %.

Ces résultats montrent que ITS et ET* sont les indices qui permettent de prévoir de façon assez précise l'astreinte sudorale au poste de couleur.

* Commentaire

Pour les conditions hygrothermiques mesurées à ce poste et pour les conditions climatiques extérieures au cours de l'étude (paramètres météorologiques moyens sur 20 heures : $t_a = 24,9^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,57$ kPa, $V_a = 1,69$ m.s⁻¹ et un ensoleillement de 523 W.m⁻²) et pour les niveaux de dépense énergétique mesurée l'astreinte thermique au poste de couleur n'est pas excessive pour un salarié acclimaté à la chaleur.

1.2.5 - Poste de couleur cuvette

Contrainte thermique

La figure 13 présente la distribution des valeurs des différents paramètres caractéristiques de la contrainte thermique.

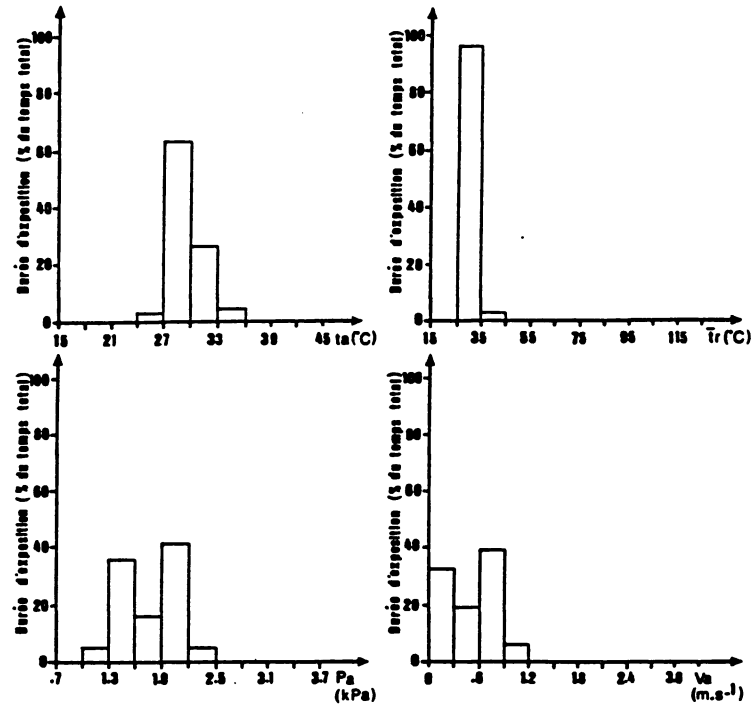


Figure 13 : Histogrammes des valeurs des paramètres physiques de l'ambiance thermique au poste de couleur cuvette

Cette situation présente une contrainte radiante et convective modérée mais la pression partielle de vapeur d'eau est importante à certains endroits du poste de travail.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 9.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	274	+ 0,2	+ 4	128	26
2	381	0	+ 4	141	22
3	291	+ 0,6	+ 13	144	36
4	183	0	- 5	122	31
5	375	+ 0,2	+ 10	158	41
Moyenne	300,8	+ 0,2	+ 5,2	138,6	
σ	73,0	0,2	6,2	12,6	

Tableau 9 : Résultats des mesures physiologiques (σ = écart-type)

Ces résultats mettent en évidence un niveau d'astreinte sudorale moyen sans répercussions importantes sur la température buccale et la fréquence cardiaque. La figure 14 présente la distribution des débits sudoraux mesurés.

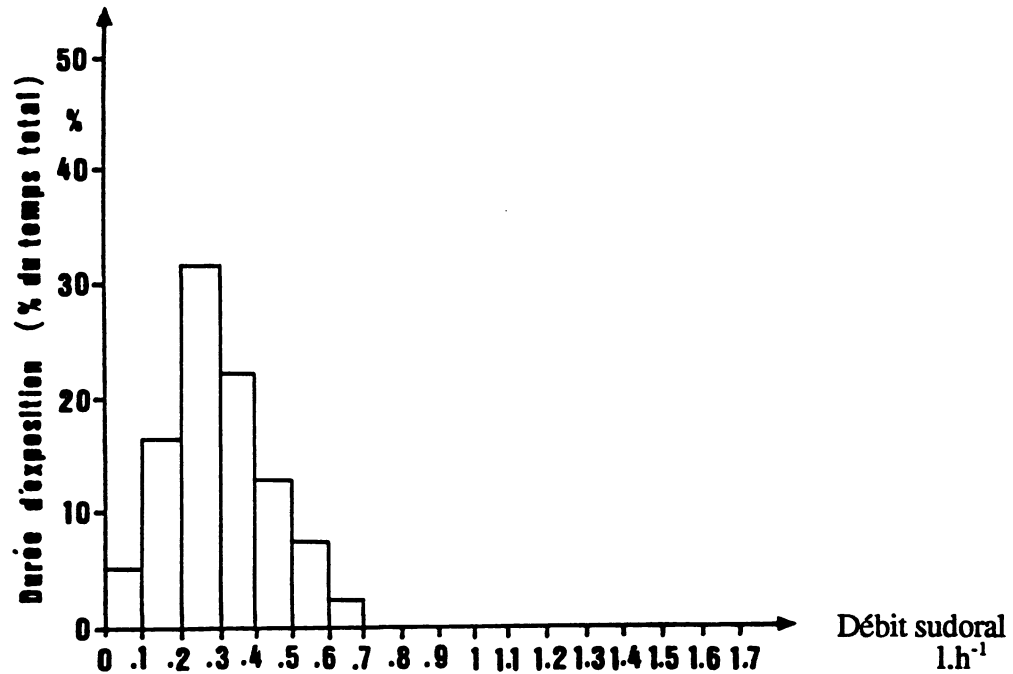


Figure 14 : Histogramme des débits sudoraux au poste de couleur cuvette

* Evolution de la contrainte

L'évolution durant les 4 heures de mesure pour chaque salarié d'un critère de contrainte et d'astreinte est représentée à la figure 15. Celle-ci montre que la contrainte est stable alors que l'astreinte, du fait de la dépense énergétique, est fluctuante. Les moyennes interindividuelles des durées d'exposition moyenne et maximale à une ambiance stable sont respectivement de 2 min et 25 s. ($\sigma = 30$ s.) et 21 min et 10 s. ($\sigma = 9$ min et 20 s.)

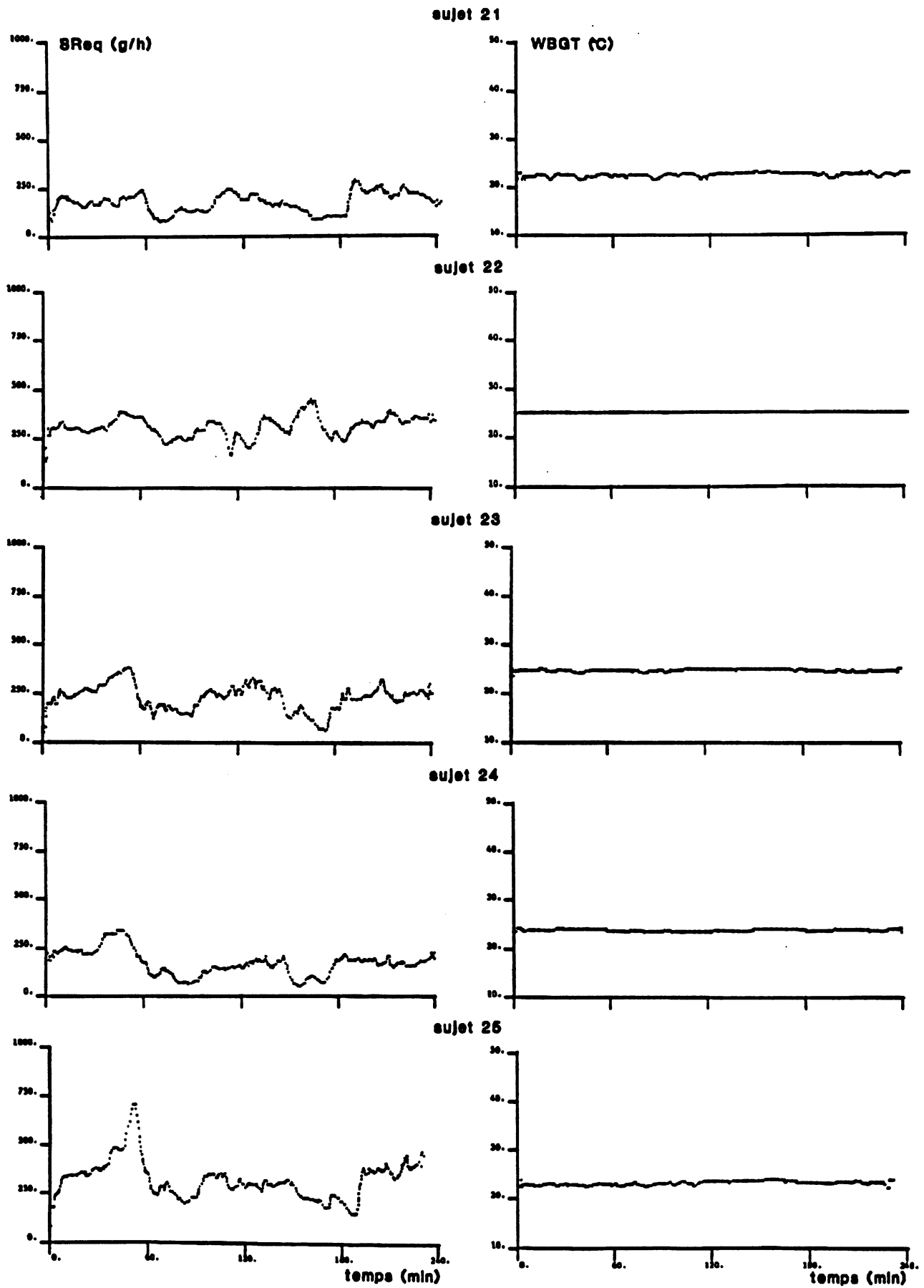


Figure 15 : Evolution dans le temps du WBGT (à droite) et de Sudation Requise (à gauche) pour les 5 salariés du poste de couleur cuvette

*** Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée**

Les valeurs de l'astreinte observée et les résultats des indices calculés sont reportés dans le tableau 10. Toutes les grandeurs sont en %.

Astreinte mesurée : 40,1 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	32,8	ISOexpo 31,2
			ISOmod 44,2
ITS		37,2	34,4
HSI		83,6	65,4
P4SR		41,8	38,8
WBGT		61,4	59,4
PPD		80,8	78,2
Teq		35,2	27,6
ET		57,4	56,0
ET*		48,8	47,8

Tableau 10 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices et de l'astreinte observée (cf. 1.1.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %

Dans cette situation le P4SR et ITS permettent de prédire de façon précise l'astreinte sudorale.

*** Commentaire**

Dans les conditions thermiques de l'atelier et pour les paramètres météorologiques moyens mesurés durant les 20 heures d'observation ($t_a = 16,6^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,22 \text{ kPa}$, $V_a = 1,0 \text{ m.s}^{-1}$ et un ensoleillement de 368 W.m^{-2}) et pour le niveau de dépense énergétique mesurée le poste de couleur cuvette ne présente pas d'astreinte thermique excessive.

1.2.6 - Poste de machiniste (machine IS en verrerie)

Contrainte thermique

La figure 16 présente la distribution des valeurs des paramètres physiques au poste de machiniste.

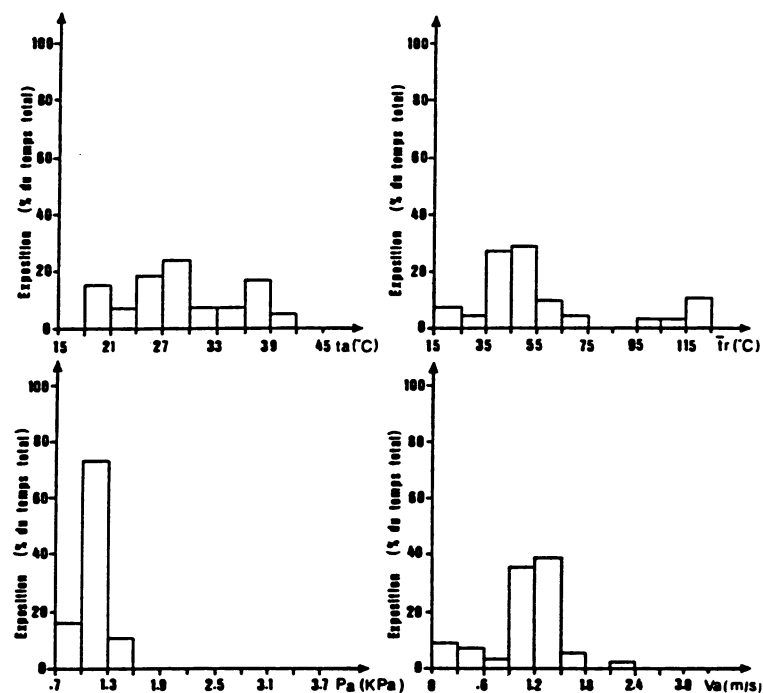


Figure 16 : Histogramme des valeurs des paramètres physiques mesurés au poste de machiniste

Ces résultats montrent la très grande dispersion de t_a et de t_r . Les expositions, en général brèves, à des températures de rayonnement élevées sont la composante principale de la contrainte.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques moyens sur les périodes de 4 heures sont présentés dans le tableau 11.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	288	- 0,1	- 3	76	19
2	294	- 0,5	- 7	84	11
3	354	0	- 2	92	25
4	406	+ 0,3	- 1	86	8
5	478	- 0,15	+ 8	86	11
Moyenne	364	- 0,1	- 1	84,8	
σ	79,9	0,3	4,9	5,2	

Tableau 11: Résultats des mesures physiologiques (σ = écart-type)

Le poste de machiniste présente une astreinte sudorale moyenne mais les astreintes thermostatique et circulatoire sont nulles au regard des moyennes interindividuelles. La figure 17 présente la distribution des débits sudoraux mesurés au poste de machiniste.

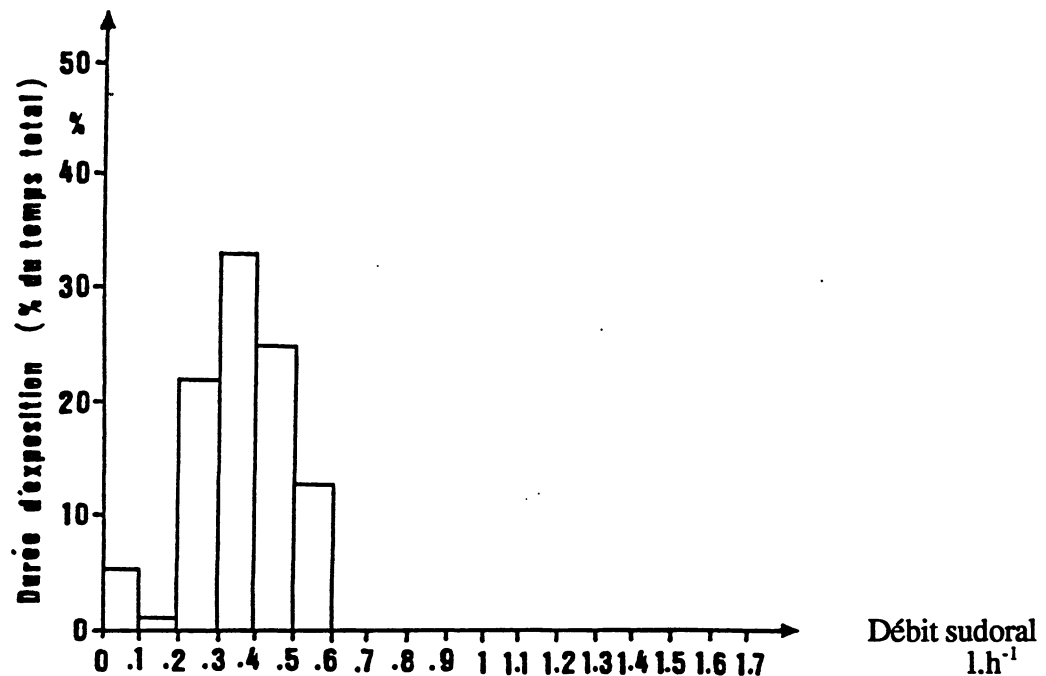


Figure 17 : Histogramme des débits sudoraux mesurés au poste de machiniste

*** Evolution de la contrainte**

L'évolution durant les 4 heures d'observation d'un indice de contrainte et d'un indice d'astreinte est présentée à la figure 18 pour les 5 salariés.

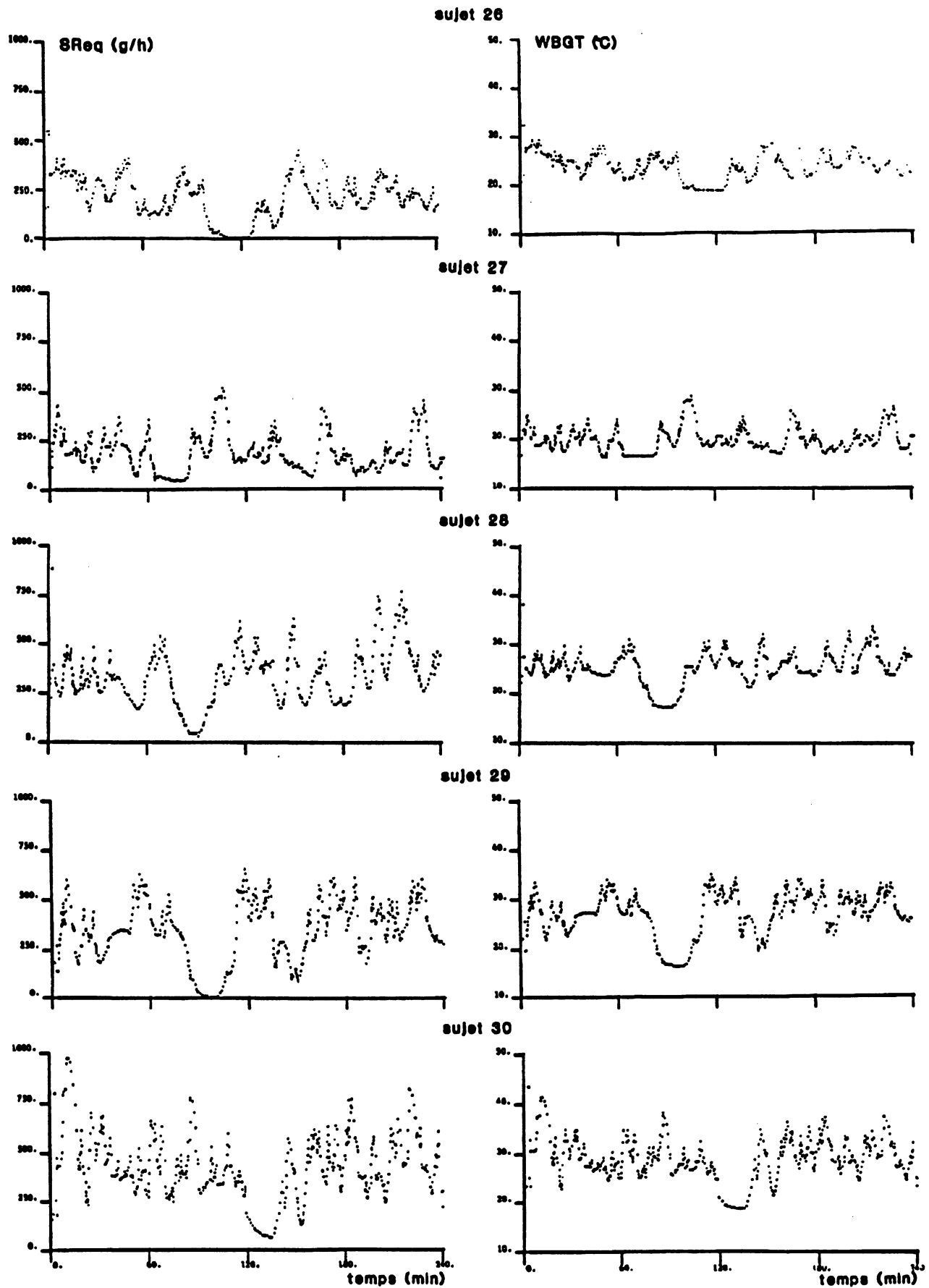


Figure 18 : Evolution en fonction du temps d'exposition des indices WBGT (à droite) et Sudation Requise (à gauche) pour les 5 machinistes

La figure 18 met en évidence la variabilité très importante de la contrainte thermique au poste de machiniste. Les moyennes interindividuelles des durées moyenne et maximale d'exposition à une ambiance stable sont respectivement de 1 min et 10 s. ($\sigma = 20$ s.) et 19 min et 10 s. ($\sigma = 2$ min et 10 s.).

*** Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée**

Les valeurs calculées des différents indices et l'astreinte observée sont reportées dans le tableau 12.

Astreinte mesurée : 48,5 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	41,2	ISOexpo 36,0 ISOmod 44,2
ITS		62,2	47,8
HSI		47,8	46,2
P4SR		71,0	61,8
WBGT		46,2	43,2
PPD		70,2	77,6
Teq		- 57,2	- 73,6
ET		43,6	48,4
ET*		44,2	48,4

Tableau 12 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices et de l'astreinte observée (cf. 1.1.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %

HSI et WBGT sont les indices qui rendent le mieux compte de l'astreinte mesurée au poste de machiniste.

*** Commentaire**

Pour les conditions thermiques dans l'atelier et à l'extérieur (paramètres météorologiques moyens sur 20 heures : $t_a = 18,5^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,1$ kPa, $V_a = 2,03$ m.s⁻¹ et un ensoleillement de 390 W.m⁻²) et pour les dépenses énergétiques mesurées l'astreinte thermique au poste de machiniste n'est pas excessive.

1.2.7 - Poste de lamineur

Contrainte thermique

Les distributions des valeurs des paramètres physiques enregistrés au poste de lamineur sont présentées à la figure 19.

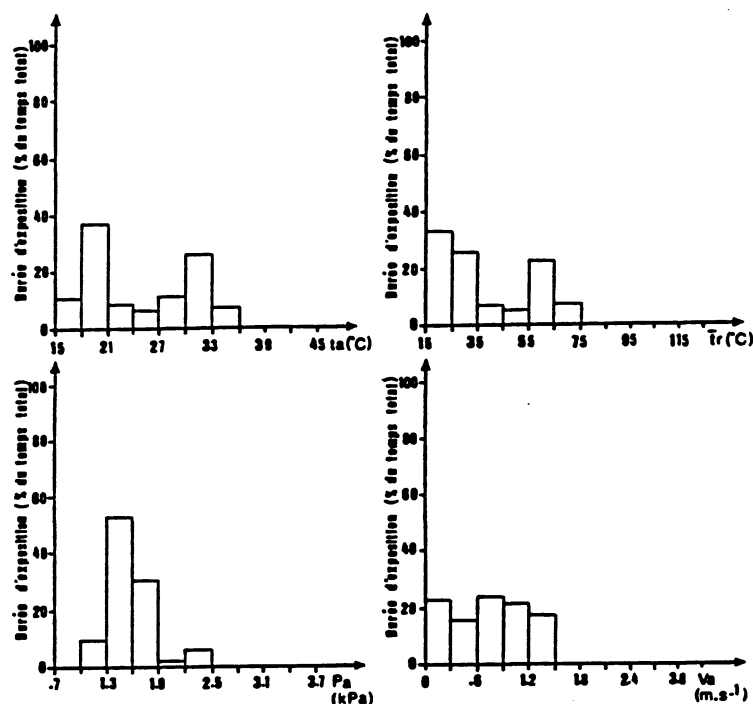


Figure 19 : Histogrammes des valeurs des paramètres physiques de l'ambiance thermique au poste de lamineur

Les résultats de la figure 19 montrent que le principal facteur physique de contrainte est la température de rayonnement (t_r). La distribution bimodale de t_a et t_r est la conséquence de l'alternance régulière de séquences de travail et de repos de 30 minutes.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 13.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	380	+ 0,5	14	106	58
2	431	+ 0,5	17	156	31
3	484	+ 0,5	+ 13	125	52
4	209	- 0,1	8	101	38
5	610	+ 0,3	5	144	48
Moyenne	422,8	0,3	11,4	126,4	
σ	147,0	0,3	4,3	21,2	

Tableau 13 : Résultats des mesures physiologiques (σ = écart-type)

Ces résultats mettent en évidence une astreinte sudorale assez importante pour certains sujets. Les différences interindividuelles sont le fait de difficultés techniques qui ont réduit de façon importante la tâche du sujet 4 et dans une moindre mesure celle des sujets 1 et 3. La figure 20 présente la distribution des débits sudoraux au poste de lamineur et montre qu'à ce poste des débits importants ont été mesurés durant les phases de travail.

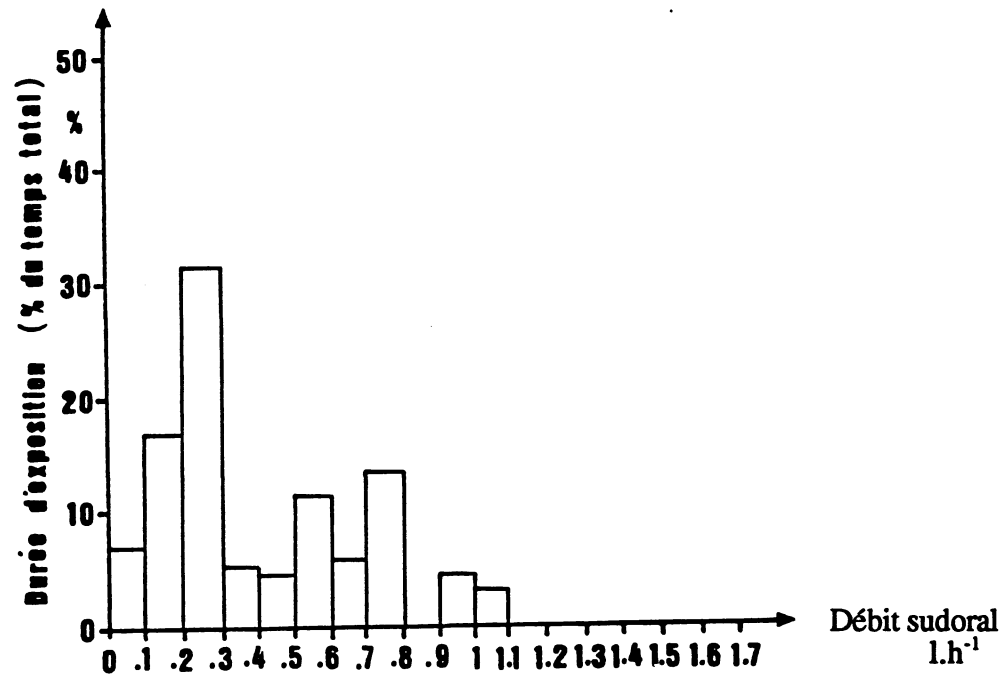


Figure 20 : Histogramme des débits sudoraux au poste de lamineur

* Evolution de la contrainte

L'évolution pendant les 4 heures de mesure, pour les 5 lamineurs, d'un indice de contrainte (WBGT) et d'astreinte (Sudation Requise) est présentée à la figure 21.

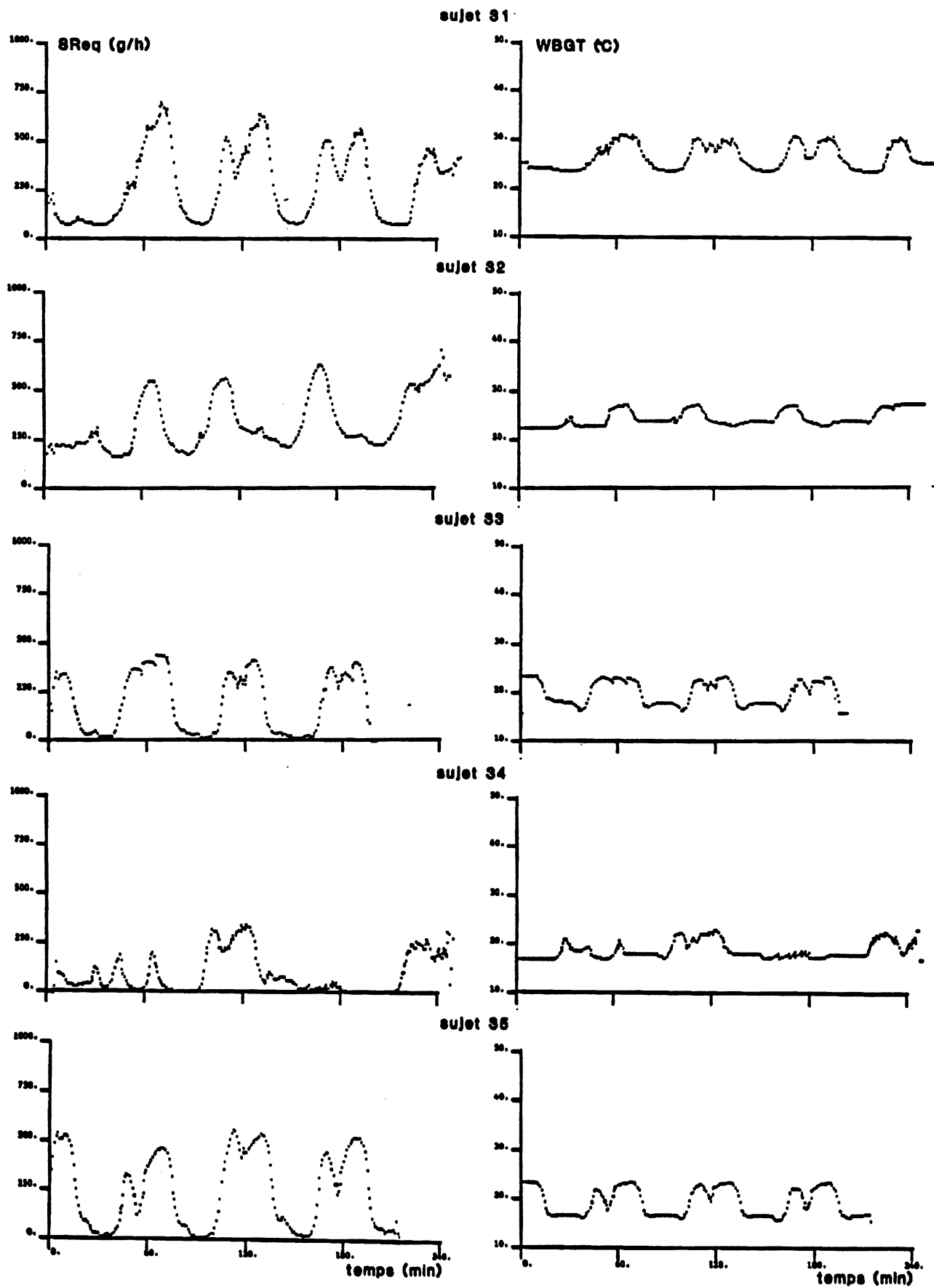


Figure 21: Evolution en fonction du temps d'exposition des indices WBGT (à droite) et Sudation Requise (à gauche)

La figure 21 montre l'alternance des phases de travail et de repos à ce poste. Les moyennes interindividuelles des durées moyenne et maximale d'exposition à une ambiance stable sont respectivement de 5 min et 50 s. ($\sigma = 2$ min et 10 s.) et 24 min et 10 s. ($\sigma = 3$ min et 40 s.).

* Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte observée

Les valeurs calculées des différents indices et l'astreinte sudorale mesurée sont reportées dans le tableau 14.

Astreinte mesurée : 56,4 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	31,6	ISOexpo 27,6
			ISOmod 30,9
ITS		43,4	28,4
HSI		49,8	44,2
P4SR		50,8	47,6
WBGT		38,4	38,6
PPD		72,6	59,2
Teq		- 31,0	- 42,4
ET		31,0	34,4
ET*		29,2	32,4

Tableau 14 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices et de l'astreinte observée (cf. 1.1.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %.

HSI et P4SR sont les indices qui dans cette situation rendent le mieux compte de l'astreinte sudorale que développent les salariés. Ces deux indices surestiment en général la contrainte radiante, ce qui dans le cas présent corrige une probable sous-estimation de t_r due à la méthode de mesure de cette dernière par le thermomètre à globe noir. Ce point est rediscuté au chapitre des résultats généraux.

* Commentaire

Pour les conditions hygrothermiques et la dépense énergétique mesurées et pour les conditions météorologiques durant les 20 heures d'observation ($t_a = 22,3^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,6 \text{ kPa}$, $V_a = 2,2 \text{ m.s}^{-1}$) et un ensoleillement de 422 W.m^{-2}) l'astreinte thermique au poste de lamineur n'est pas excessive. L'alternance de phases de travail et de repos permet de maintenir l'astreinte en deçà des valeurs limites.

1.2.8 - Poste de trempeur

Contrainte thermique

La figure 22 présente la distribution des valeurs et des paramètres physiques au poste de trempe sur montage et montre que la contrainte est principalement radiante.

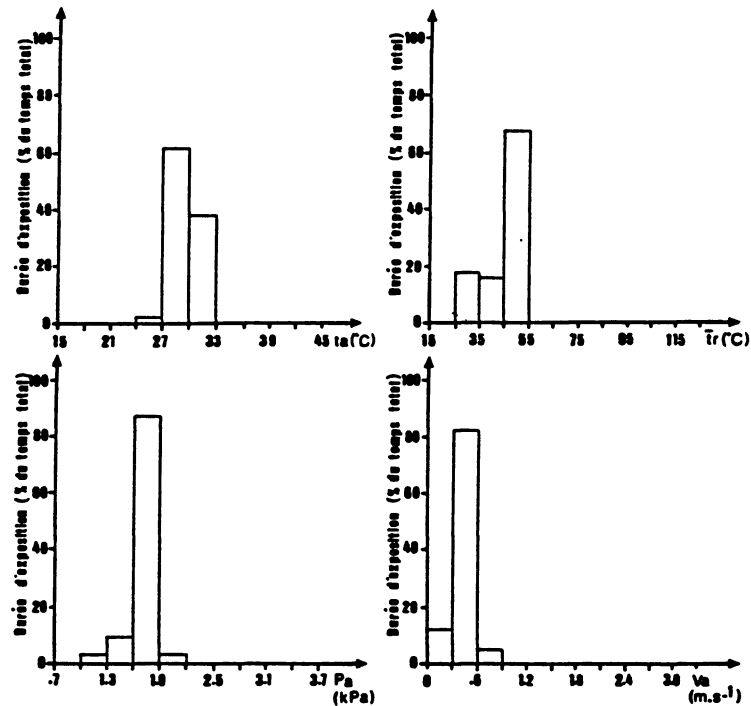


Figure 22 : Histogrammes des valeurs des paramètres physiques mesurés au poste de trempe sur montage

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 15.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	388	0	- 6	112	27
2	419	- 1,0	+ 5	82	25
3	543	+ 0,3	- 2	135	42
4	436	- 0,2	- 4	125	7
5	446	+ 0,3	+ 12	112	27
Moyenne	446,4	0,1	+ 2	113,2	
σ	58,3	0,2	6,1	17,8	

Tableau 15 : Résultats des mesures physiologiques (σ = écart-type)

Les résultats présentés au tableau 15 montrent que l'astreinte sudorale est assez importante, mais que les répercussions tant circulatoires que thermostatiques de la contrainte sont faibles. La distribution des débits sudoraux mesurés est présentée à la figure 23.

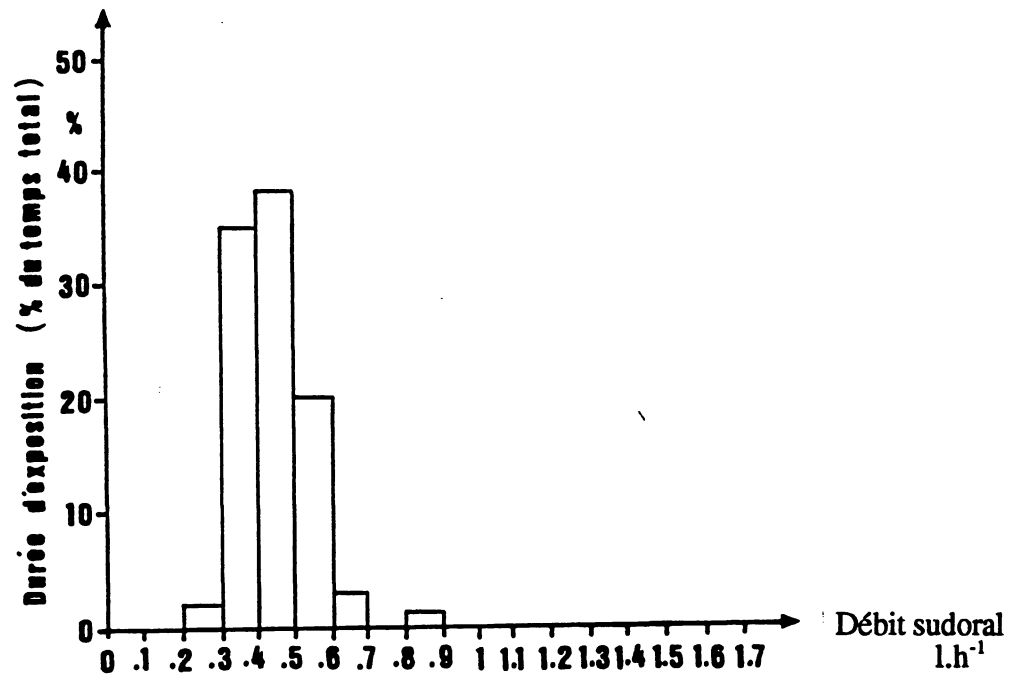


Figure 23 : Histogramme de la distribution des débits sudoraux mesurés au poste de trempe sur montage

* Evolution de la contrainte

L'évolution, durant les 4 heures de mesure pour chaque salarié, d'un indice de contrainte (WBGT) et d'un indice d'astreinte (Sudation Requisite) est présentée à la figure 24.

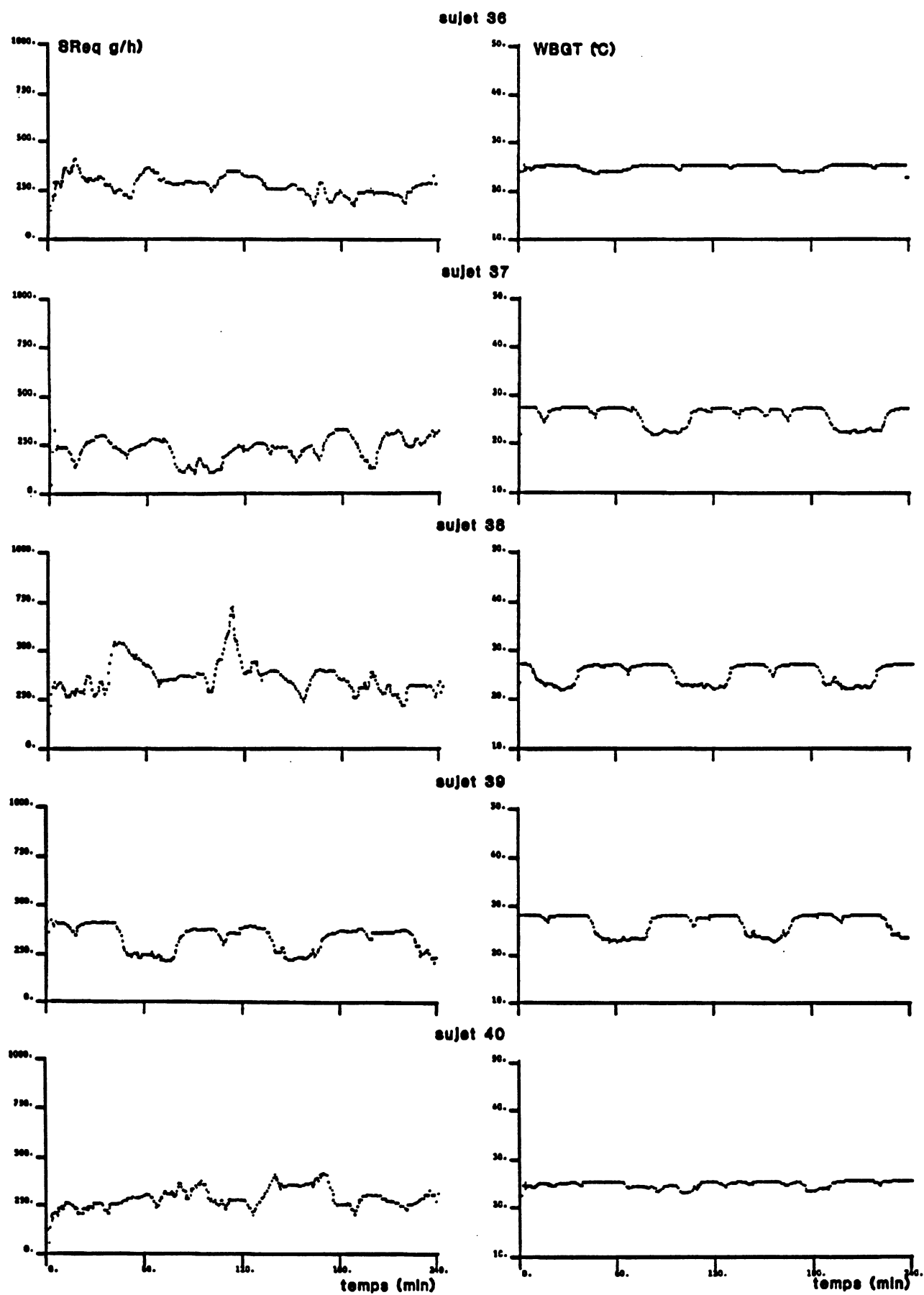


Figure 24 : Evolution en fonction du temps du WBGT (à droite) et de la Sudation Requise (à gauche) pour les 5 salariés au poste de trempeur

Les moyennes interindividuelles des durées moyenne et maximale d'exposition à une ambiance stable sont respectivement 5 min et 20 s. ($\sigma = 1$ min et 55 s.) et 29 min et 5 s. ($\sigma = 45$ s.).

*** Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée**

Les résultats des différents indices et de l'astreinte sudorale mesurée sont présentés dans le tableau 16.

Astreinte mesurée : 59,5 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	40,4	ISOexpo 39 ISOmod 52,2
ITS		49,2	47,0
HSI		96,0	92,8
P4SR		65,6	63,0
WBGT		62,0	60,4
PPD		93,4	95,6
Teq		77,6	73,2
ET		67,2	66,0
ET*		56,4	55,2

Tableau 16 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices et de l'astreinte observée (cf. 1.1.4)

A ce poste les indices ET*, P4SR et WBGT permettent la meilleure prévision de l'astreinte sudorale.

*** Commentaire**

Pour les conditions hygrothermiques et la dépense énergétique mesurées à ce poste et pour les paramètres météorologiques extérieurs moyens relevés au cours des mesures ($t_a = 24,6^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,4$ kPa, $V_a = 1,0$ m.s⁻¹ et un ensoleillement de 478 W.m⁻²) l'astreinte thermique n'est pas excessive à ce poste.

1.2.9 - Poste de soudeur (fond de générateur de vapeur)

Contrainte thermique

La figure 25 présente la distribution des valeurs des différents paramètres physiques caractéristiques de la contrainte thermique au poste de soudeur.

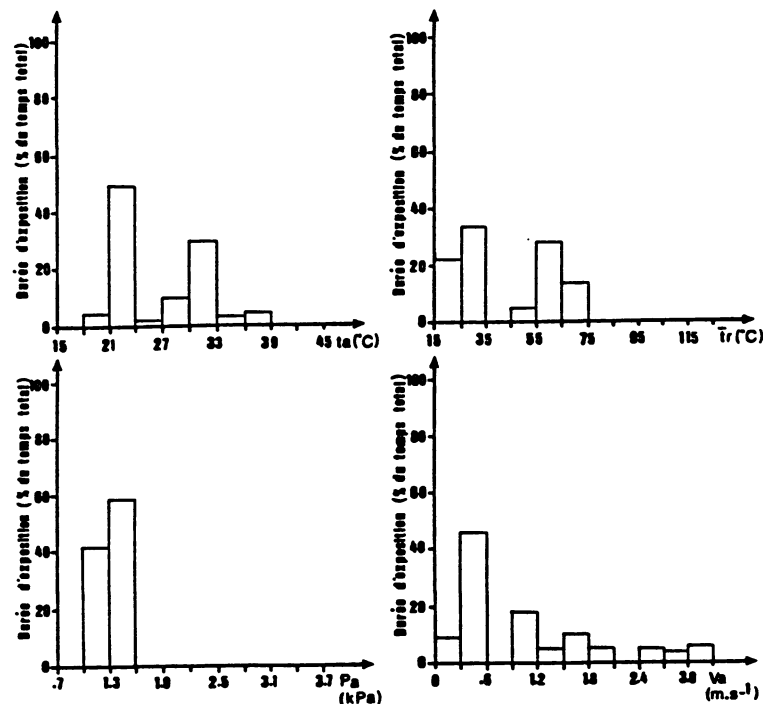


Figure 25 : Histogrammes des valeurs des paramètres physiques de l'ambiance thermique au poste de soudeur

La figure 25 met en évidence les deux types de situations thermiques auxquels étaient soumis les soudeurs. D'une part une exposition à des conditions de quasi neutralité thermique dans l'atelier durant les phases de récupération et, d'autre part, pendant le travail dans le fond du générateur de vapeur, un rayonnement important (45 - 75 °C) et des t_a et V_a également élevées.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 17.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	333	+ 0,2	+ 0	97	8
2	223	+ 0,4	0	69	15
3	232	+ 0,05	2	71	7
4	263	- 0,1	1	96	41
5	225	0	6	86	20
Moyenne	255,2	0,1	1,8	83,8	
σ	46,4	0,2	2,2	11,9	

Tableau 17 : Résultats des mesures physiologiques (σ = écart-type)

Au vu des résultats sur les 4 heures d'observation, l'astreinte thermique est faible. Ceci est la conséquence des temps d'exposition courts (de 20 à 50 minutes) durant les phases de soudage. La figure 26 montre la distribution des débits sudoraux mesurés.

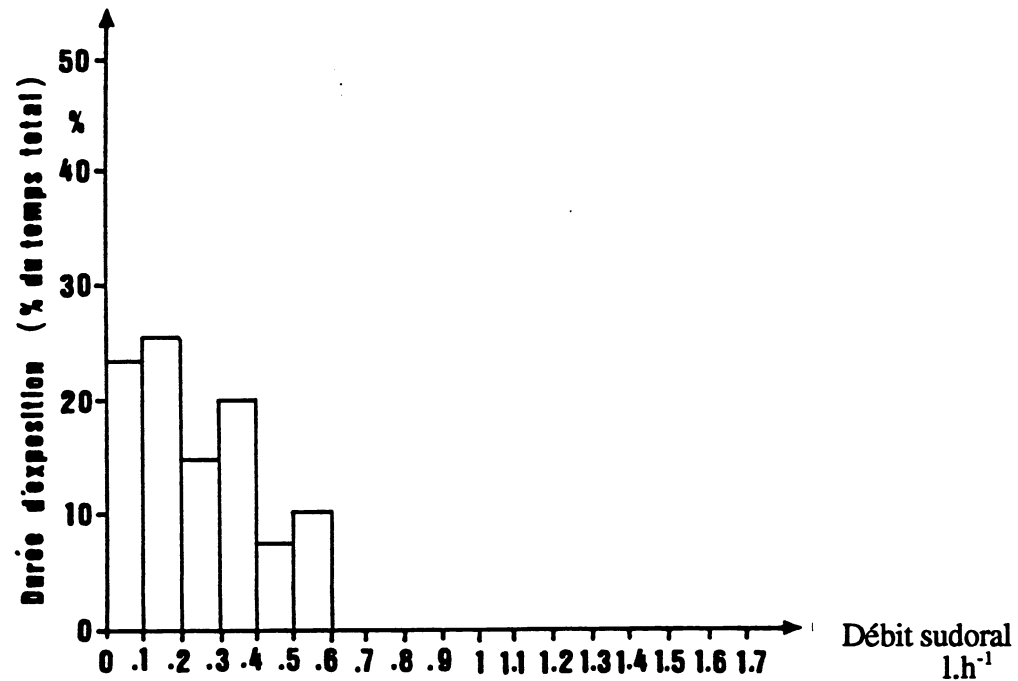


Figure 26 : Histogramme des débits sudoraux au poste de soudeur

Les débits sudoraux durant les phases de soudage dans le fond du générateur de vapeur ne sont jamais supérieurs à 600 g.h^{-1} pourtant ces phases de travail doivent être limitées en durée d'exposition du fait d'une astreinte thermostatique trop importante. Ce point est abordé au chapitre des résultats de l'ensemble des postes.

* Evolution de la contrainte

L'évolution au cours des 4 heures de mesures, pour les 5 salariés d'un indice de contrainte et d'un indice d'astreinte est représentée à la figure 27.

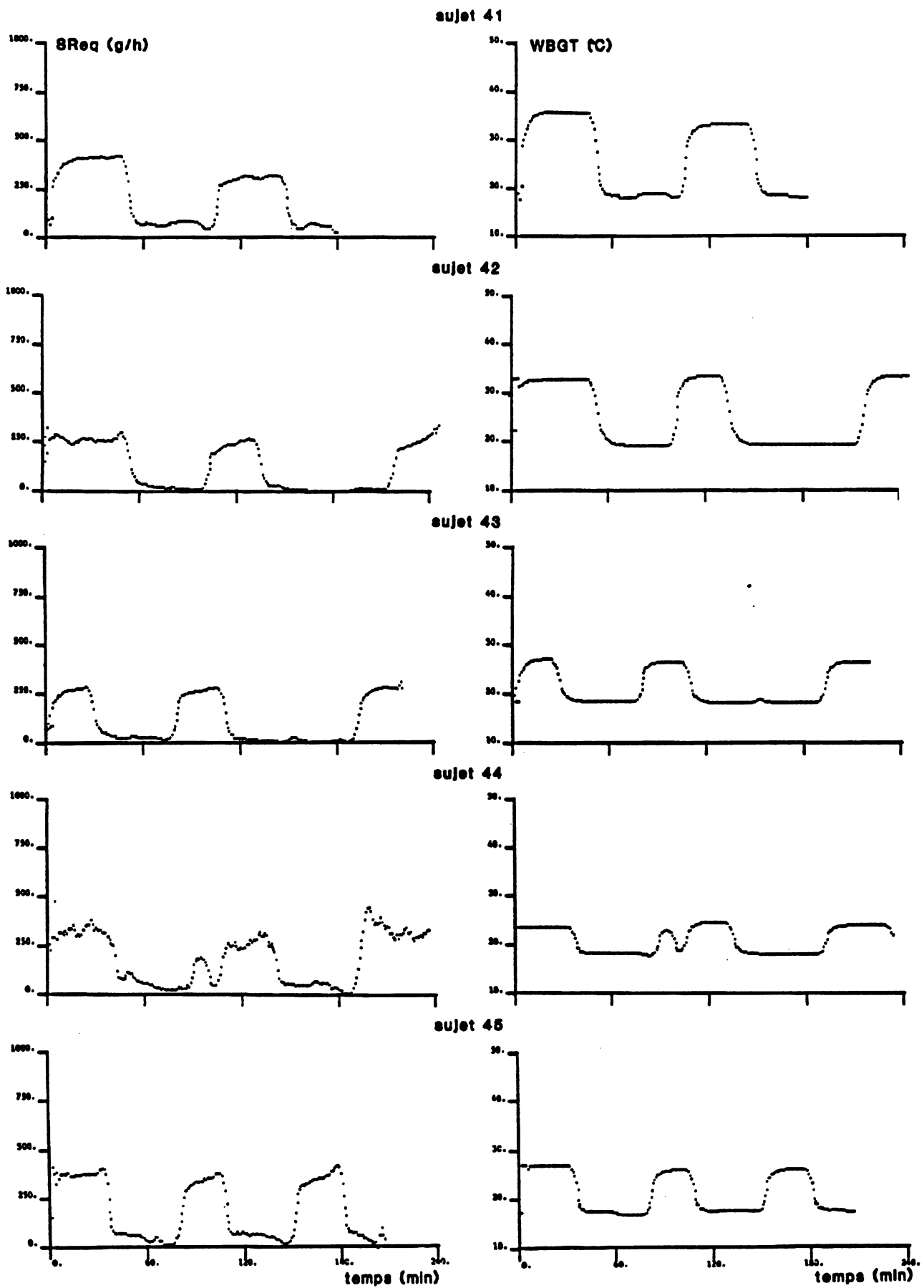


Figure 27 : Evolution dans le temps du WBGT (à droite) et de la Sudation Requise (à gauche) pour les 5 soudeurs

L'alternance des séquences de travail dans le générateur de vapeur et en dehors, dans l'atelier, est mise en évidence à la figure 27. Les moyennes interindividuelles des durées moyenne et maximale d'exposition à une ambiance stable sont respectivement de 24 min et 20 s. ($\sigma = 6$ min et 10 s.) et 57 min et 50 s. ($\sigma = 14$ min et 5 s.).

*** Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée**

Les valeurs de l'astreinte sudorale observée et les résultats calculés des divers indices sont reportés dans le tableau 18. Toutes les grandeurs sont en %.

Astreinte mesurée : 34 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	22,4	ISOexpo 21,2
			ISOmod 27,4
ITS		30,2	23,6
HSI		27,8	27,0
P4SR		48,8	39,6
WBGT		27,8	26,4
PPD		54,2	53,2
Teq		- 84,0	- 101,8
ET		21,4	22
ET*		24,6	27,6

Tableau 18 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices de l'astreinte observée (cf. 1.1.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %

Dans cette condition l'indice ITS donne la meilleure estimation de l'astreinte observée.

*** Commentaire**

Pour les conditions thermohygrométriques et la dépense énergétique, mesurées au poste de soudeur et pour les paramètres météorologiques extérieurs ($t_a = 19,5^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,3$ kPa, $V_a = 1,8$ m.s⁻¹) l'astreinte thermique au poste de soudeur n'est pas excessive. Le fait de laisser aux soudeurs le libre choix de leur temps d'exposition dans le fond du générateur de vapeur permet de maintenir l'astreinte à un niveau acceptable.

1.2.10 - Poste de tappeur tunnel (décochage en fonderie)

Contrainte thermique

La figure 28 présente la distribution des valeurs des différents paramètres caractéristiques de la contrainte thermique au poste de tappeur tunnel.

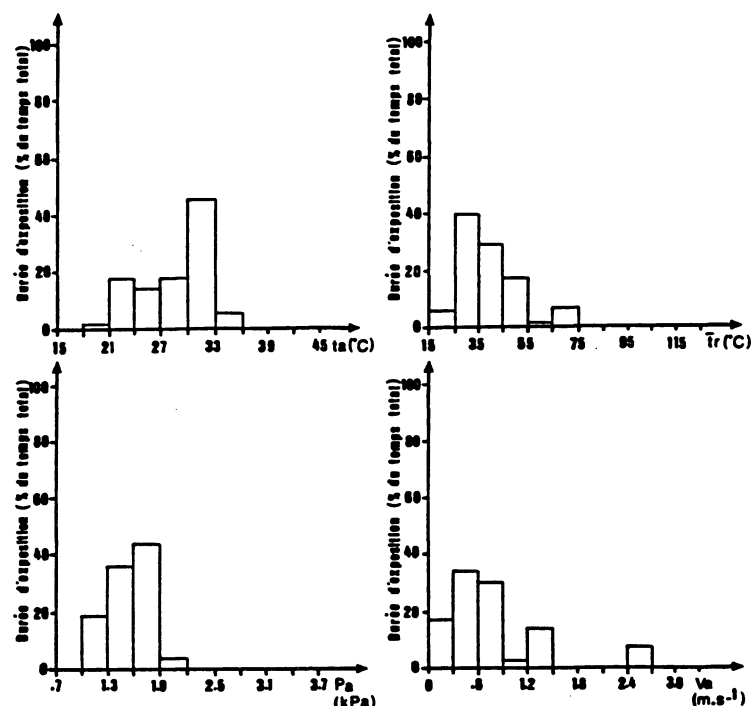


Figure 28 : Histogrammes des valeurs des paramètres physiques de l'ambiance thermique au poste de tappeur tunnel

La principale contrainte thermique à ce poste est la température de rayonnement.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 19.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	175	- 0,3	6	103	45
2	264	0	4	74	23
3	308	- 0,15	1	81	39
4	290	+ 0,2	7	81	37
5	271	+ 0,3	18	100	39
Moyenne	261,6	0,1	7,2	87,8	
σ	51,4	0,2	5,8	11,5	

Tableau 19 : Résultats des mesures physiologiques (σ = écart-type)

Les résultats physiologiques mettent en évidence une astreinte thermique faible. Ceci est la conséquence du faible niveau de la dépense énergétique mesurée. En effet, au cours de la pré-étude, la charge thermique endogène (le métabolisme énergétique) était importante à ce poste, mais durant l'étude des cinq salariés de nombreuses difficultés techniques ont ralenti le travail. La figure 29 montre la distribution des débits sudoraux mesurés au poste de tappeur tunnel.

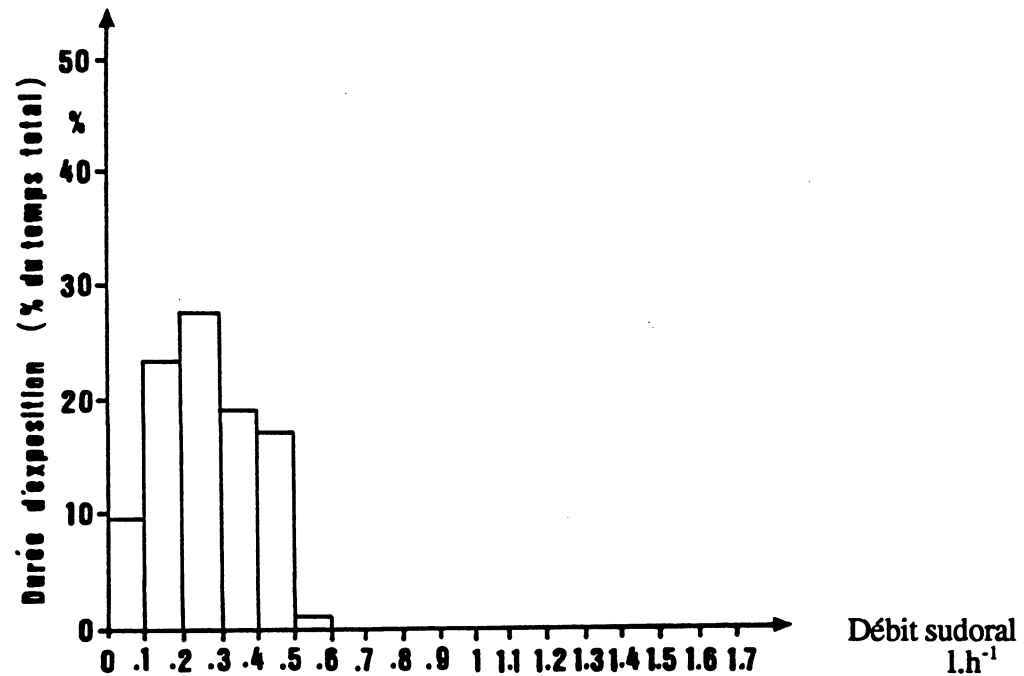


Figure 29 : Histogramme des débit sudoraux mesurés au poste de tappeur tunnel

* Evolution de la contrainte

L'évolution au cours des 4 heures de mesure, pour chaque salarié, d'un indice de contrainte et d'astreinte est représentée à la figure 30.

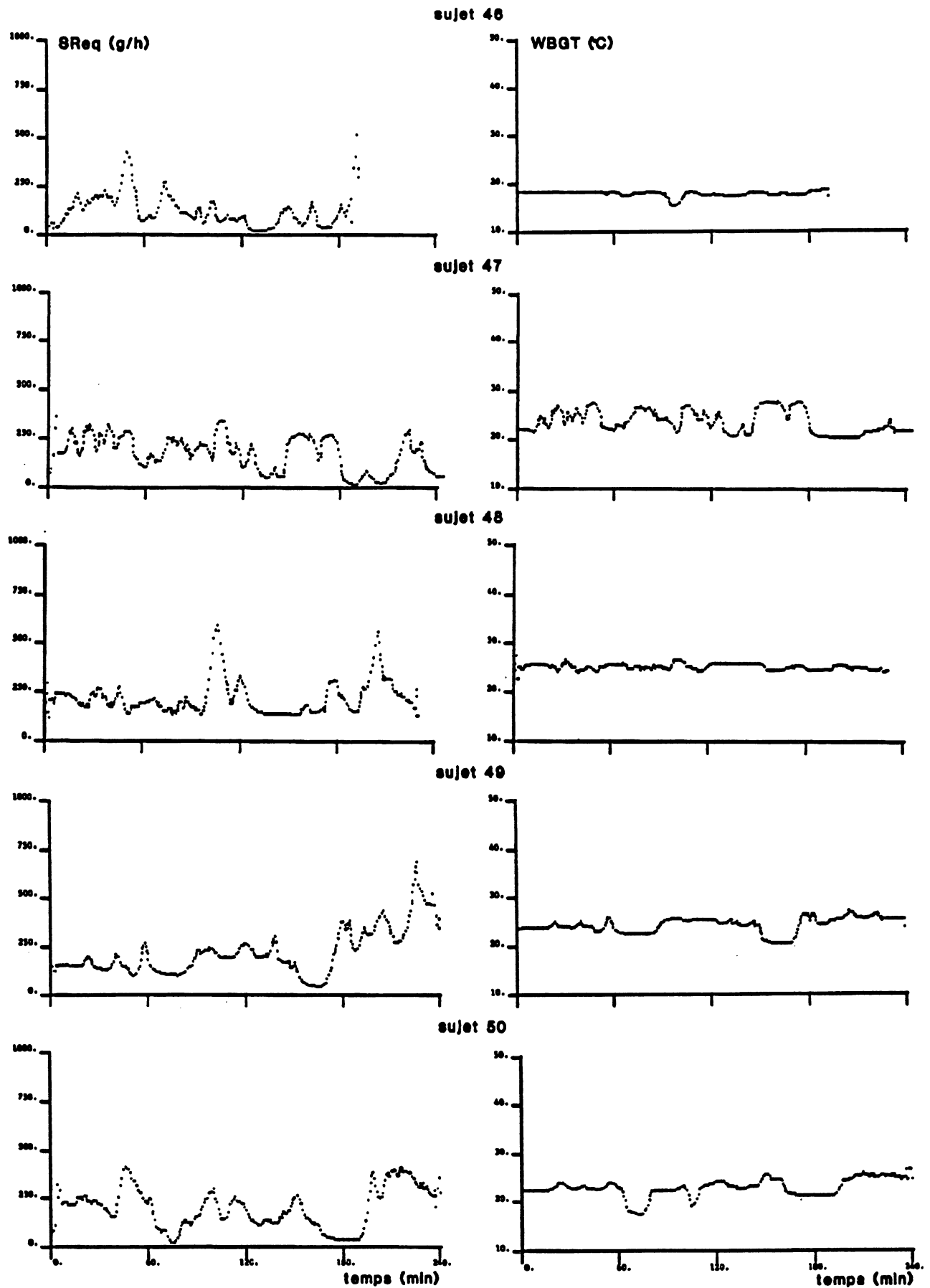


Figure 30 : Evolution dans le temps du WBGT (à droite) et de la Sudation Requise (à gauche), pour les 5 salariés du poste tappeur tunnel

Les moyennes interindividuelles des durées moyenne et maximale d'exposition à une ambiance stable sont respectivement 5 min et 10 s. ($\sigma = 3$ min et 50 s.) et 47 min et 30 s. ($\sigma = 16$ min et 20 s.).

Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée

Les valeurs de l'astreinte sudorale observée et les résultats des calculs des divers indices sont reportés dans le tableau 20.

Astreinte mesurée : 34,9 %			
Indices	Calcul	ség/ség	Expo
Sudreq	ISO	25,4	ISOexpo 23,8
			ISOmod 30,4
ITS		28,6	24,6
HSI		39,4	36,2
P4SR		44,2	40,0
WBGT		24,4	27,8
PPD		67,4	67,2
Teq		- 49,6	- 55,4
ET		30,8	31,0
ET*		33,0	33,0

Tableau 20 : Moyennes interindividuelles des résultats des indices et de l'astreinte observée (cf. 3.1.4). Toutes les valeurs sont exprimées en %

ET* est l'indice qui permet la meilleure prévision de l'astreinte sudorale à ce poste.

* Commentaire

Dans les conditions thermohygrométriques de l'atelier, pour les dépenses énergétiques mesurées et pour les conditions météorologiques moyennes durant les 20 heures de mesure ($t_a = 21,6^\circ\text{C}$, $P_{aH_2O} = 1,4$ kPa et $V_a = 1,5$ m.s⁻¹) l'astreinte thermique au poste de tappeur tunnel n'est pas excessive. Ces conclusions devraient sans aucun doute être révisées au cas où le fonctionnement normal de la chaîne de démoulage entraînerait une dépense énergétique importante.

1.2.11 - Poste expérimental cellule chaude

Contrainte thermique

La figure 31 présente la distribution des valeurs des différents paramètres physiques caractéristiques de l'ambiance thermique.

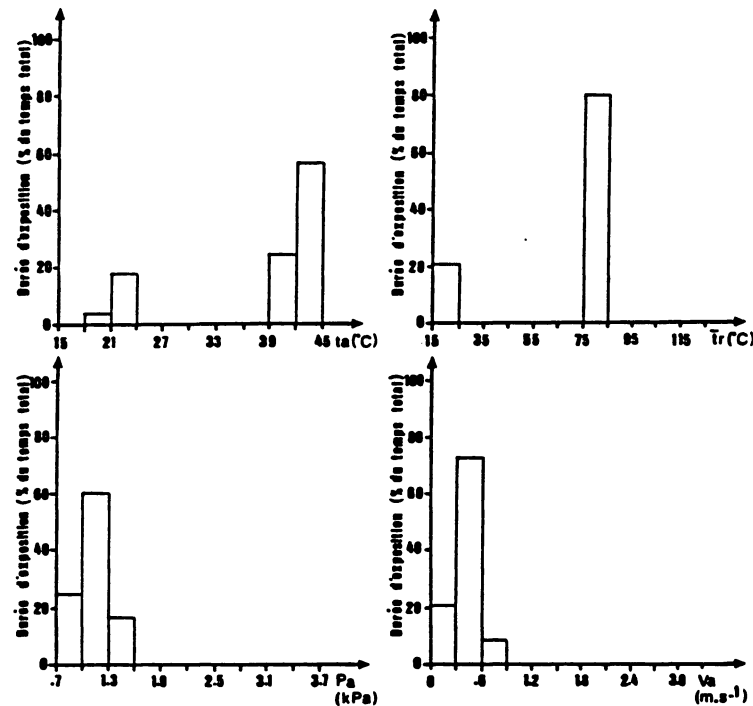


Figure 31 : Histogrammes des valeurs des paramètres physiques de l'ambiance thermique au poste expérimental

Cette situation présente une contrainte convective forte et radiante très forte. La distribution bimodale de t_a et t_r s'explique par les alternances des expositions à la chaleur (30 min) avec des périodes de repos en situation de confort thermique (10 min).

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 21.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	570	+ 1,2	14	93	12
2	554	+ 0,6	20	100	14
3	594	+ 0,6	16	92	11
4	582	+ 0,6	17	98	15
5	718	+ 0,3	6	91	17
Moyenne	603,6	0,68	14,6	94,8	
σ	65,6	0,29	5,3	3,5	

Tableau 21 : Résultats des mesures physiologiques (σ = écart-type)

Ces résultats montrent une astreinte sudorale importante et surtout des astreintes thermostatiques et circulatoires élevées. En effet ces répercussions sont obtenues après quatre expositions de 30 minutes séparées par des périodes de 10 minutes de récupération en situation de confort thermique. Pour les 5 sujets la durée d'exposition subie était subjectivement une durée limite d'exposition. La figure 32 présente la distribution des débits sudoraux mesurés.

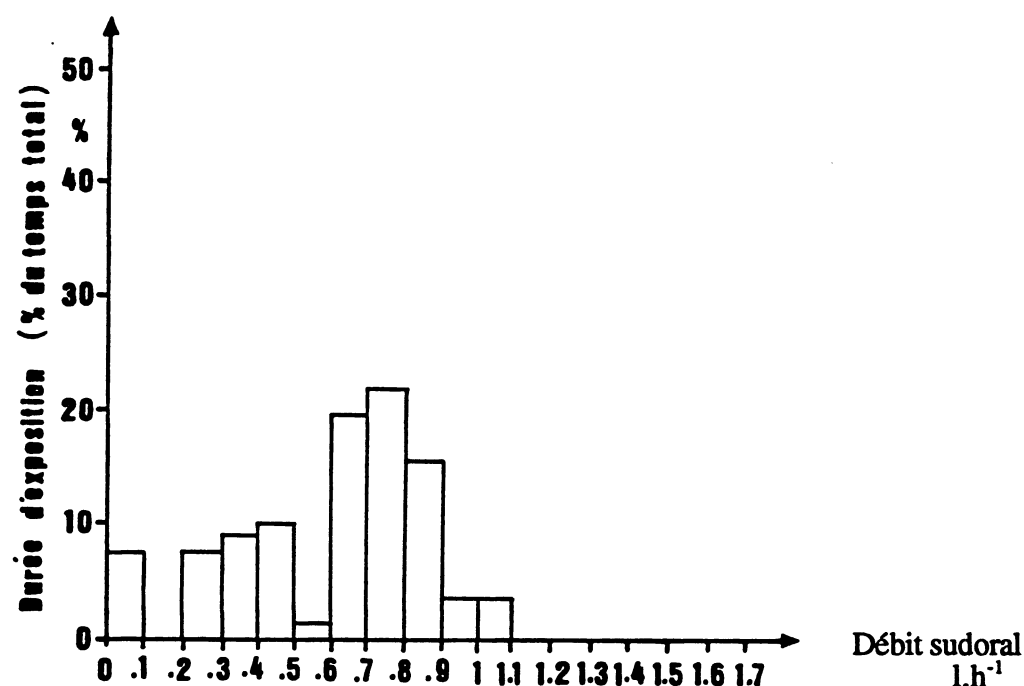


Figure 32 : Histogramme des débits sudoraux mesurés durant l'exposition en chambre chaude

*** Evolution de la contrainte**

L'évolution durant les 2 heures 30 minutes d'exposition d'un indice de contrainte et d'un indice d'astreinte est présentée à la figure 33.

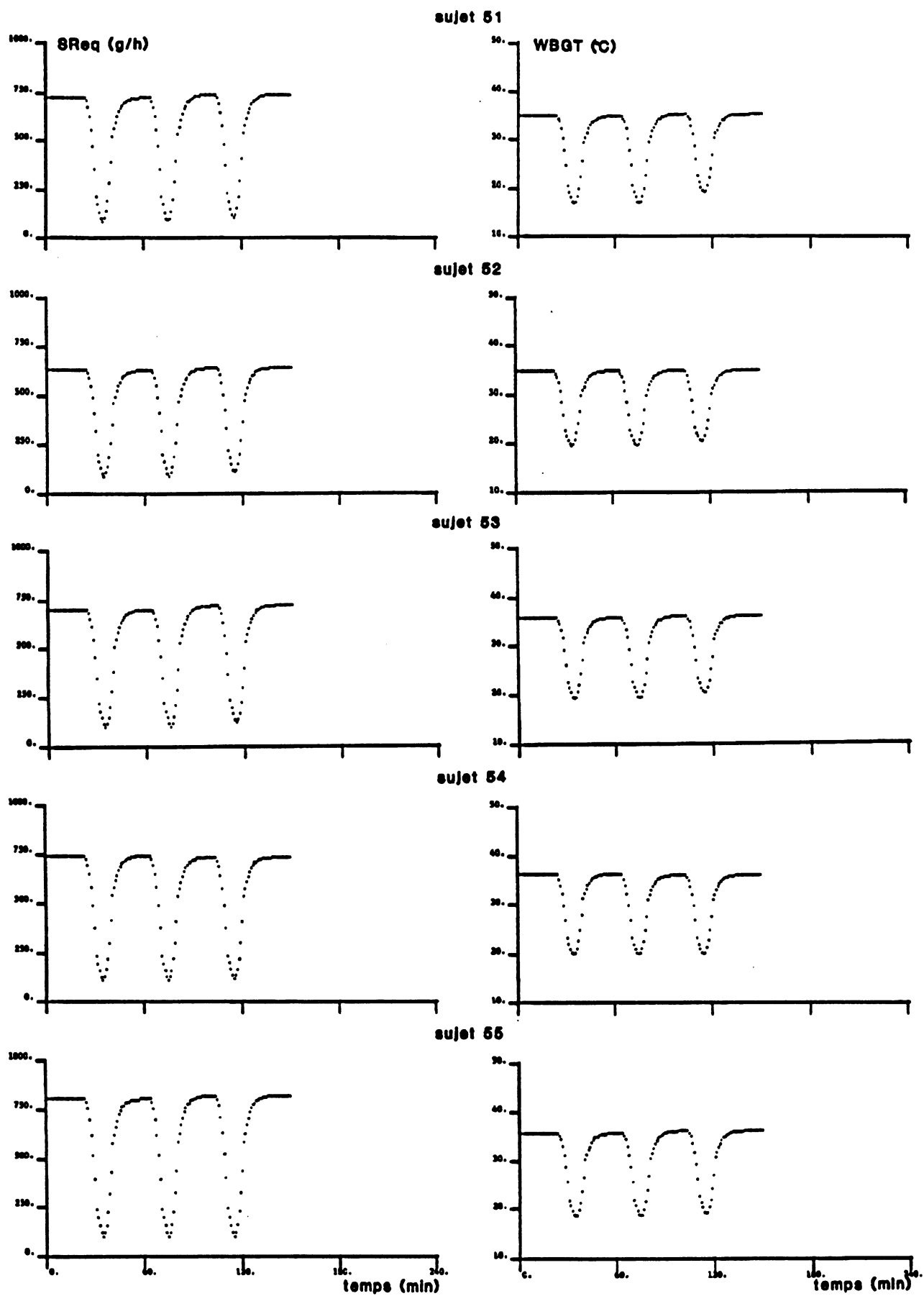


Figure 33 : Evolution dans le temps du WBGT (à droite) et de la Sudation Requise (à gauche) pour les 5 sujets d'expérience en chambre chaude

*** Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée**

Les valeurs de l'astreinte sudorale mesurée et des résultats des divers indices calculés sont reportées dans le tableau 22.

Astreinte mesurée : 80,5 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	78,4	ISOexpo 68 ISOmod 88,2
ITS	125,0		99,2
HSI	120,2		119,0
P4SR	162,6		132,2
WBGT	97,6		90,6
PPD	84,2		98,6
Teq	167,2		135,4
ET	84,8		89,0
ET*	66,6		74,0

Tableau 22 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices et de l'astreinte observée (cf. 3.4.1). Toutes les valeurs sont exprimées en %

L'indice sudation requise (ISO) et à un degré moindre ET sont les indices les plus précis pour la prévision de l'astreinte sudorale dans cette situation. La surestimation de l'influence de la température de rayonnement sur le niveau de l'astreinte par l'indice P4SR est très nette et se traduit par une surestimation importante de l'astreinte mesurée par la contrainte calculée.

*** Commentaire**

L'astreinte thermique (sudorale, thermostatique) implique dans cette situation une durée limite d'exposition.

1.2.12 - Poste de mineur (mines de potasse)

Contrainte thermique

La figure 34 présente la distribution des valeurs mesurées des paramètres physiques de l'ambiance thermique au poste de mineur.

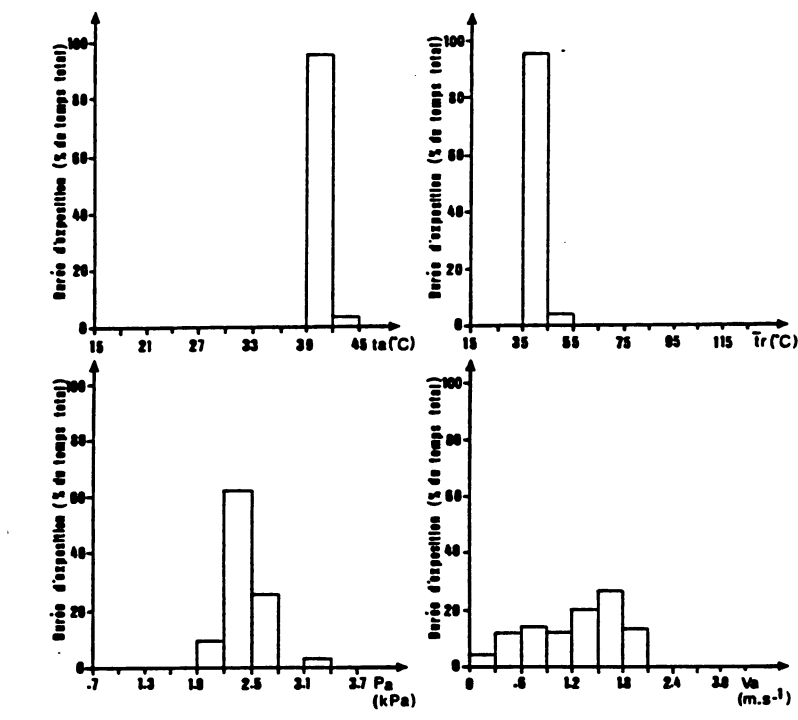


Figure 34 : Histogrammes des valeurs mesurées des paramètres physiques au poste de mineur

La contrainte thermique au poste de mineur est surtout convective et radiante. Néanmoins la pression partielle de vapeur d'eau mesurée à ce poste est élevée et ceci est assez particulier. En effet l'humidité dans les mines de potasse est en général faible. Les vitesses d'air mesurées sont également élevées et aggravent de ce fait la contrainte convective.

Astreinte thermique

Les résultats des mesures physiologiques sont présentés dans le tableau 23.

Sujet	Sudation gr.h ⁻¹	Dtbu °C	DFc b.min ⁻¹	Métabolisme	
				W.m ⁻²	σ
1	805	+ 0,2	0	154	69
2	663	+ 0,2	5	145	58
3	453	+ 0,1	2	108	58
4	835	+ 0,3	17	146	63
5	546	+ 0,3	14	114	45
Moyenne	660	0,22	7,6	133,4	
σ	164	0,07	6,7	18,7	

Tableau 23 : Résultats des mesures physiologiques (σ = écart-type)

L'astreinte sudorale est élevée au poste de mineur. Par contre les astreintes thermostatiques et circulatoires sont faibles. L'équilibre du bilan thermique, mis en évidence par les faibles astreintes thermostatiques et circulatoires peut être assuré dans cette situation à forte contrainte thermique au prix de débits sudoraux importants dont la distribution est présentée dans la figure 35.

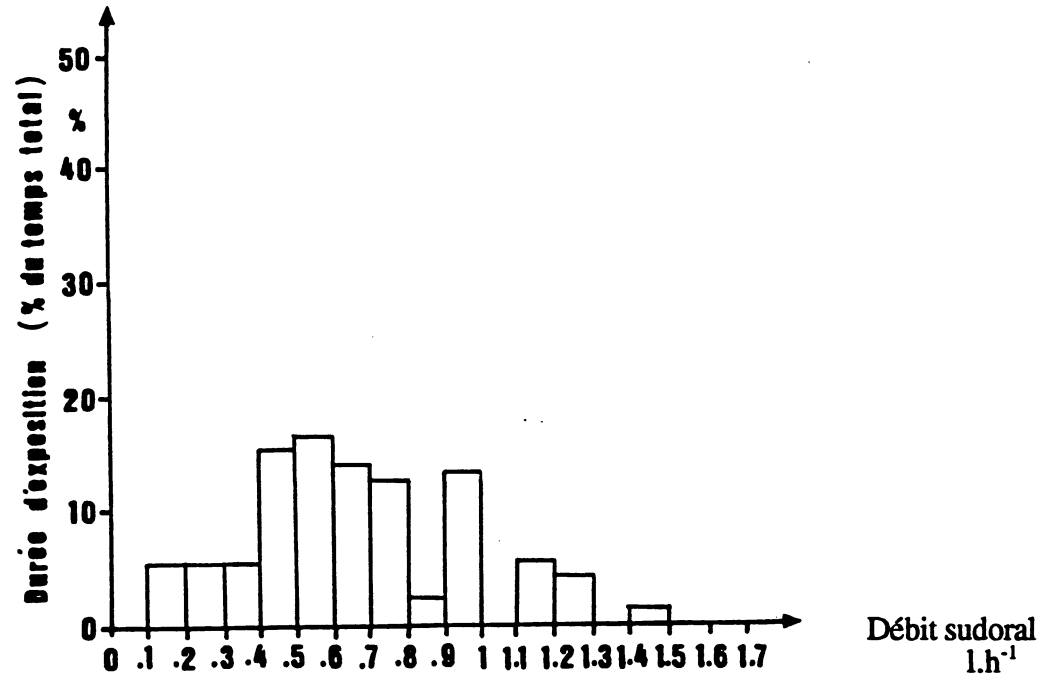


Figure 35 : Histogramme des débits sudoraux mesurés au poste de mineur

* Evolution de la contrainte

L'évolution durant les 4 heures de mesure d'un indice de contrainte et d'un indice d'astreinte est reproduite dans la figure 36.

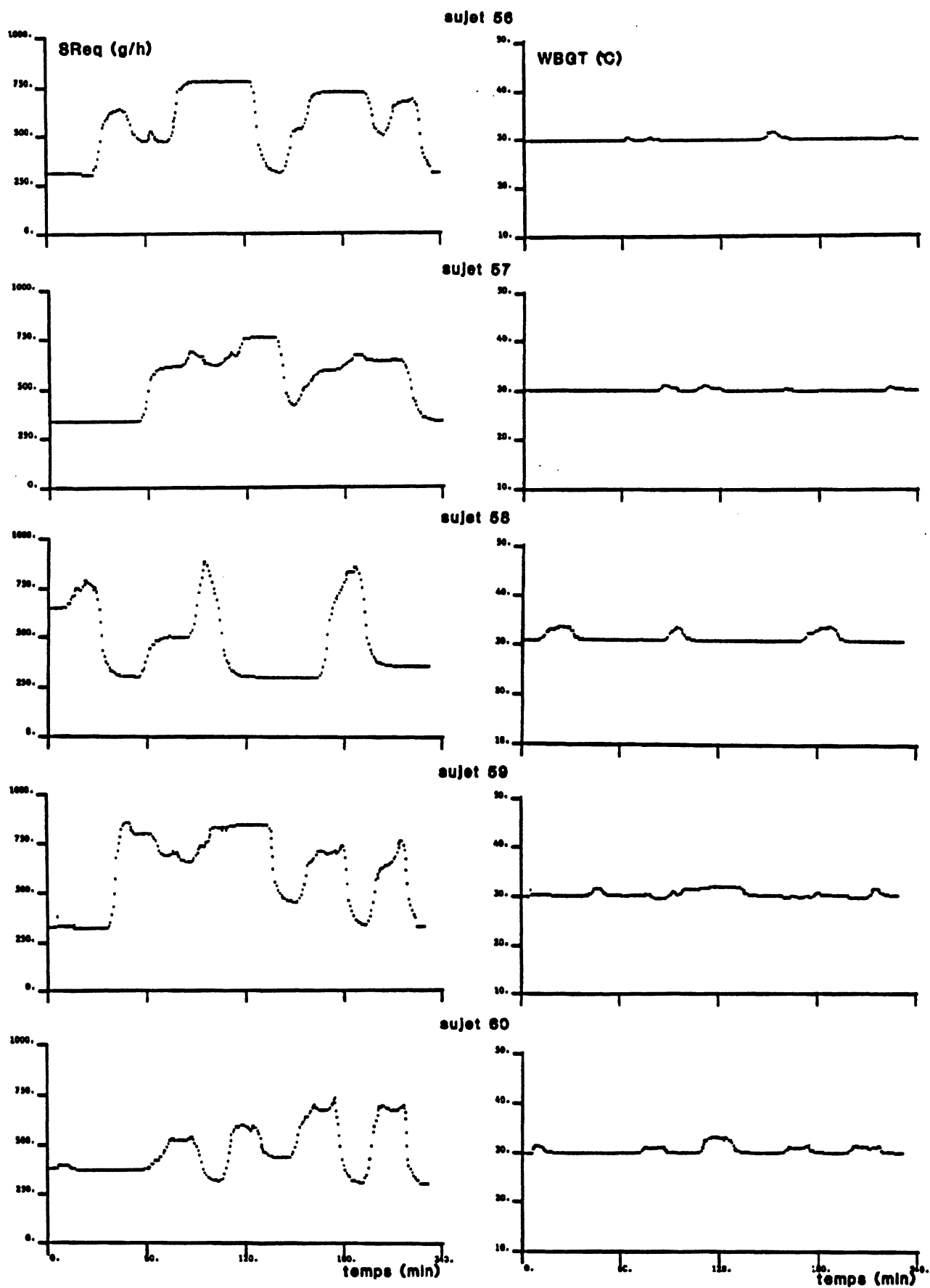


Figure 36 : Evolution en fonction du temps d'exposition du WBGT (à droite) et de la Sudation Requise (à gauche) pour les 5 mineurs

A ce poste les grandeurs physiques de contrainte varient peu, par contre l'astreinte thermique présente des écarts de niveaux importants du fait de l'alternance de situations de repos et d'activités physiques lourdes. Les moyennes interindividuelles des durées moyenne et maximale d'exposition à une ambiance stable sont respectivement 7 min et 40 s. ($\sigma = 2$ min et 30 s.) et 51 min et 50 s. ($\sigma = 15$ min et 50 s.).

*** Comparaison des contraintes prédites et de l'astreinte mesurée**

Les valeurs de l'astreinte sudorale et des résultats calculés des différents indices sont reportées dans le tableau 24.

Astreinte mesurée : 88 %			
Indices	Calcul	séq/séq	Expo
Sudreq	ISO	71,2	ISOexpo 68 ISOmod 88
ITS		77,0	73,0
HSI		96,4	81,0
P4SR		73,0	70,0
WBGT		99,0	97,2
PPD		100,0	98,2
Teq		31,4	30,0
ET		86,0	85,0
ET*		79,2	77,2

Tableau 24 : Moyennes interindividuelles (sur 5 salariés) des résultats des indices et de l'astreinte observée (cf. 3.4.1). Toutes les valeurs sont exprimées en %

Dans cette situation de travail Sudation Requise (ISOmod) et ET sont les indices qui rendent le mieux compte de l'astreinte sudorale mesurée.

*** Commentaire**

Dans les conditions d'ambiance physique et de dépense énergétique rencontrées au poste de mineur une durée limite d'exposition (DLE) s'impose. Cette limite sera principalement fonction de la dépense énergétique qui est très variable à ce poste (Figure 36) et peut être très importante durant certaines phases de travail. Le calcul des DLE est discuté dans le paragraphe qui présente les résultats de l'ensemble des postes.