

ECHANGES THERMIQUES ET FONCTION THERMOREGULATRICE DE L'HOMME,
EN ALTITUDE.

J.D. GUIEU et P. VARENE.

Institut Bolivien de Biologie d'Altitude, LA PAZ, Bolivie -
Laboratoire de Physiologie, U.E.R. de Médecine, Université de LILLE II,
Place de Verdun 59045-LILLE CEDEX -
Laboratoire de Physiologie, U.E.R. de Médecine, Université de BORDEAUX II,
146, rue Léo Saignat 33076-BORDEAUX.

Deux ordres de faits sont susceptibles d'entraîner des modifications d'expression de la fonction thermorégulatrice en altitude. D'une part, les caractéristiques physiques différentes de l'environnement par rapport au niveau de la mer doivent nécessairement retentir sur certaines modalités physiques d'échanges de chaleur entre la peau et l'ambiance. D'autre part, les réajustements observés en altitude au niveau de nombreuses autres fonctions de l'organisme (cardio-circulatoire, respiratoire, etc..) ne peuvent manquer de retentir également sur la régulation thermique qui s'effectue en grande partie par leur intermédiaire.

Dans le cadre de l'Institut Bolivien de Biologie d'Altitude, et en raison de l'intérêt présenté du point de vue fondamental aussi bien qu'appliqué, plusieurs missions ont étudié la fonction thermorégulatrice du sujet né et résidant en altitude. Le plus souvent, des études conjuguées ont été réalisées chez des sujets nés au niveau de la mer, transplantés en altitude ou évoluant dans leur milieu naturel, permettant ainsi une approche comparative.

C'est essentiellement la thermorégulation au chaud qui a retenu l'attention. A ce titre, les effets de deux modalités de mise en jeu de la fonction ont été plus particulièrement étudiés et seront abordés successivement. La première modalité a été réalisée par une charge thermique modérée induite par exercice musculaire, la seconde par une charge thermique d'origine externe notable visant à dépasser les capacités du système régulateur. Dans les deux cas, on a cherché à préciser le rôle de l'anhydride carbonique dans les réponses observées.

A- EFFET D'UNE CHARGE THERMIQUE MODEREE D'ORIGINE INTERNE

1- Etude principale

Protocole et méthodes.

L'étude a été réalisée en utilisant les techniques de calorimétrie fractionnelle permettant l'évaluation des différents postes du bilan thermique (17)

Les expériences ont porté sur 5 sujets amériidiens (A) nés et résidant en altitude (HA) (3800 m, Pb = 494 torrs) ; une étude comparative étant réalisée chez 3 sujets caucasiens (C) après trois semaines d'acclimatement à LA PAZ et également dans leur environnement naturel au niveau de la mer (NM) (PARIS, 50 m, Pb = 761 torrs).

Le protocole expérimental a été identique pour tous les sujets. Après une période de contrôle d'une heure, assis, au repos, chaque sujet effectuait₂ sur bicyclette ergométrique un exercice submaximal d'une puissance de 53 W.m pendant 25 minutes. La température ambiante (globe) était similaire en altitude et au niveau de la mer (20,9° et 20,5°), de même que la pression de vapeur d'eau (8 et 9 torrs).

(Travail réalisé avec l'aide du Ministère des Affaires étrangères -
coopération technique)

Les données suivantes ont été recueillies :

- températures ambiantes (globe, sèche, humid)
- températures cutanées (en 10 localisations standardisées)
- températures centrales oesophagienne ($T_{œ}$) et rectale (T_{re})
- évolution pondérale par pesées discontinues
- consommation d'oxygène en circuit ouvert \dot{V}_{O_2}

Les températures étaient mesurées toutes les deux minutes, la \dot{V}_{O_2} toutes les minutes (états transitoires) ou toutes les cinq minutes (états stables).

L'équation du bilan thermique peut s'écrire :

$$\dot{M} = \dot{R} + \dot{C} + \dot{E} + \dot{W} + \dot{S} \quad \text{en W.m}^{-2}$$

avec \dot{M} : la production totale d'énergie calculée à partir de la \dot{V}_{O_2} (équivalent énergétique de l'oxygène : $20,27 \text{ kJ L}^{-1}$ au repos - $R = 0,8$ et $21,11 \text{ kJ L}^{-1}$ à l'exercice - $R = 1$)

$\dot{R} + \dot{C}$: les pertes de chaleur par radiation et convection, calculées avec un coefficient de transfert de chaleur $h_r + c$ égal à $6,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ au niveau de la mer et $6,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ en altitude (3).

\dot{E} : le débit évaporatoire calculé à partir de la perte de poids ($\pm 10 \text{ g}$) corrigée pour le carbone expiré (chaleur latente d'évaporation de $2,4 \text{ kJ.g}^{-1}$)

\dot{S} : le stockage thermique calculé selon la relation classique (4) en utilisant la pondération suivante : $0,8 \Delta T_{œ}$ $0,2 \Delta T_s$. La température cutanée moyenne ΔT_s est calculée à partir des températures cutanées (10)

Résultats.

Données thermiques.

Au repos, la température rectale moyenne des amérindiens est plus élevée que celle des caucasiens au niveau de la mer ($37,1^\circ \text{ C}$ et $36,8^\circ \text{ C}$). T_{re} s'élève chez ces derniers à $37,2^\circ \text{ C}$ après trois semaines de séjour en altitude. Les différences restent cependant non significatives. La température cutanée moyenne est peu différente pour les trois groupes de sujets.

A l'exercice, la température oesophagienne qui est un index de la température profonde plus fidèle que T_{re} dans les états transitoires, s'élève et croît encore à la fin de l'épreuve chez tous les sujets. Les écarts entre les valeurs de repos et de fin d'exercice sont du même ordre de grandeur (tableau -I-). La température cutanée moyenne augmente chez les sujets dans leur environnement d'origine mais diminue significativement ($P.05$) chez les sujets transplantés en altitude (tableau -I-).

	C - NM Pb 761	C - HA Pb 494	A - HA
$\Delta T_{œ} \text{ . C}$	+ 0.55	+ 0.57	+ 0.65
$\Delta T_s \text{ . C}$	+ 0.85	+ 0.45	+ 0.47

Tableau -I- Variations des températures corporelles à la fin de l'exercice.

(C - NM : caucasiens au niveau de la mer,
C - HA : caucasiens transplantés en altitude,
A - HA : amérindiens résidant en altitude).

Bilan thermique à l'exercice.

La production totale d'énergie \dot{M} est peu différente chez les sujets caucasiens en altitude ou au niveau de la mer. Elle est légèrement plus élevée chez les amérindiens (C - HA $276 \pm 6,4$; C - NM $265 \pm 5,0$; A - HA $322 \pm 4 \text{ W.m}^{-2}$). La somme des autres postes du bilan calculés indépendamment s'identifie

étroitement à la production totale d'énergie lorsqu'un état stable est atteint en fin d'exercice (figure -1A-).

Les pertes par radiation-convection sont réduites en altitude, quel que soit le groupe. Les pertes de chaleur par évaporation E , non corrigées pour les pertes évaporatoires respiratoires et calculées en faisant l'hypothèse d'un débit sudoral constant au cours de l'exercice s'accroissent en altitude (C - NM 96 ± 8 ; C - HA 129 ± 22 ; A - HA 127 ± 11 $W.m^{-2}$). Le stockage thermique S diminue chez les caucasiens en altitude ($47 \pm 8,7$ $W.m^{-2}$) par rapport aux deux autres groupes (C - NM $57 \pm 4,5$; A - HA $58 \pm 9,1$ $W.m^{-2}$).

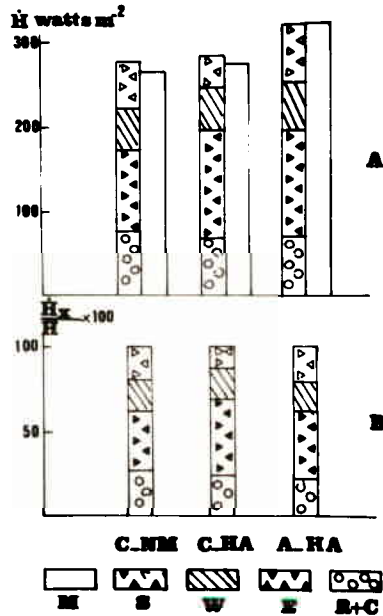


Figure -1- Bilan énergétique entre la 15eme et la 25eme minute d'exercice.

A- valeurs absolues de la production énergétique
 B- pourcentage des postes du bilan énergétique (voir texte)
 C- NM et C - HA caucasiens au niveau de la mer et en altitude
 A - HA amérindiens (d'après -17-)

Discussion

Dans les conditions de l'expérimentation on n'observe pas d'état thermique stable à la fin de l'exercice. La température profonde s'accroît de même que le stockage thermique.

L'accroissement de la température profonde est pratiquement le même pour les trois groupes. Du strict point de vue du contrôle de la température profonde, l'efficacité du système thermorégulateur n'est donc modifiée ni par l'altitude, ni plus particulièrement par l'augmentation de la charge relative à l'altitude (diminution de la \dot{V}_{O_2} max.). Ceci vérifie l'hypothèse de NIELSEN selon laquelle la température profonde dépend essentiellement des ajustements thermorégulateurs et non des conditions externes(14). Ces résultats sont en accord avec ceux de GREENLEAF (7) et ASSMUSSEN (2).

Certaines modalités d'échange de chaleur entre la peau et l'ambiance sont modifiées de façon prévisible en altitude en fonction de la diminution de la pression barométrique. La variation de la masse volumique de l'air joue

essentiellement par une réduction du coefficient conjugué d'échange de chaleur par radiation-convection dans sa composante convective (convection libre ou forcée). Ceci se traduit par un ajustement des postes du bilan thermique en altitude par rapport au niveau de la mer ainsi qu'il apparaît dans la figure -1B-.

La diminution de $\dot{R} + \dot{C}$ est compensée essentiellement par un accroissement du débit évaporatoire \dot{E} . La modification est particulièrement nette chez le caucasien transplanté dont la température cutanée moyenne décroît au cours de l'exercice ; delà entraîne une réduction accrue des pertes par radiation-convection et un stockage thermique moins élevé que chez l'amérindien en situation similaire.

Les transferts de chaleur noyau-périphérie sont également modifiés en altitude en raison de la réduction du débit sanguin cutané (13, 5 et J.P. MARTINEAUD dans cet ouvrage) qui est le facteur majeur de la conductance physiologique. Dans ces conditions, le maintien d'un transfert de chaleur inchangé pour une charge thermique interne identique ne peut se réaliser que par un élargissement du gradient thermique profondeur - superficie ($T_{\alpha} - T_s$).

C'est ce que l'on observe avec les deux groupes d'altitude (C - HA et A - HA) chez lesquels la modification du gradient thermique est surtout le fait au repos, de l'augmentation de la température centrale. C'est également ce qui se confirme dans les conditions de l'exercice pendant lequel l'augmentation du débit sanguin musculaire devient de surcroît prioritaire. Dans ce cas, la réduction du débit cutané est particulièrement responsable de la diminution de la température cutanée (C - HA) ou de sa moindre augmentation (A - HA) par rapport à ce que l'on observe au niveau de la mer (C - NM, tableau -I-) ; la température cutanée reste naturellement liée par ailleurs à l'évolution du débit évaporatoire.

2- Etudes complémentaires

Dans une première série complémentaire de recherches, on a voulu préciser l'effet de la puissance de l'exercice (charge interne de chaleur) et de la température ambiante sur les réponses thermorégulatrices observées, de façon à réaliser une approche dynamique des phénomènes thermorégulateurs.

Les mêmes techniques de calorimétrie fractionnelle que celles décrites ci-dessus et un protocole similaire ont été utilisés.

Les sujets utilisés : 4 amérindiens en altitude et 2 caucasiens au niveau de la mer et en altitude, ont effectué des exercices de 50, 70 et 90 watts pendant 25 minutes pour deux températures ambiantes de 20 et 33° C. La totalité des résultats est rapportée par ailleurs (15). La dispersion des données chez les sujets amérindiens n'a pas permis d'interprétation globale pour leur groupe. Par contre, la comparaison des données recueillies chez les sujets caucasiens en altitude et au niveau de la mer conduit à retenir les éléments de discussion suivants :

- quelle que soit la température ambiante, la température centrale est plus élevée en altitude qu'au niveau de la mer et croît avec la puissance de l'exercice. Par contre, la température cutanée moyenne reste indépendante de la puissance de l'exercice et dépend de la température ambiante. Elle décroît et de façon plus importante pour l'ambiance la plus tempérée (- 1,2° C pour 20° C d'ambiance).
- le gradient thermique noyau-périphérie reste augmenté en altitude quelle que soit la puissance développée et est plus important à 20 ° C qu'à 33° C d'ambiance.
- le débit sudoral croît en fonction de la puissance de l'exercice d'une part, de la température ambiante d'autre part.

Finalement, ces résultats permettent d'établir que chez le caucasien, quelle que soit la température ambiante, l'acclimatation à l'altitude ne

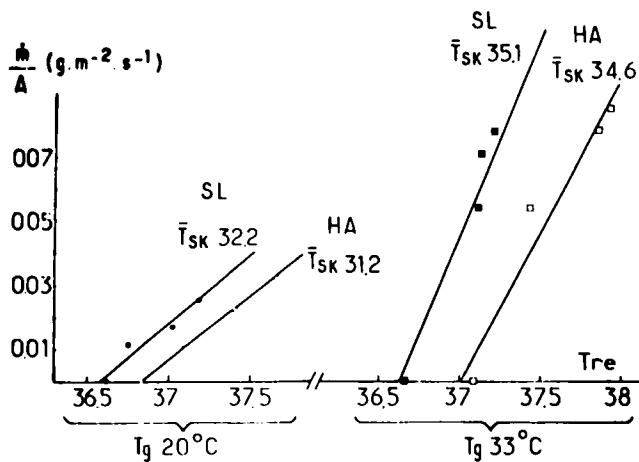


Figure -2- Débit sudoral en fonction de la température rectale pour deux valeurs de températures ambiante (T_g). Observations au niveau de la mer (SL) et en altitude (HA). La température cutanée moyenne est inscrite au voisinage de la droite correspondante (d'après -15-).

modifie pas la pente de la relation entre le débit sudoral et la température profonde ainsi que l'indique la figure -2-, mais qu'elle entraîne un décalage de l'ordonnée à l'origine de cette relation traduisant un effet vraisemblable sur la valeur de consigne du système de commande sudorale. Le gain de ce dernier augmente par contre avec la température ambiante ainsi que l'indiquent les modifications de pente observées.

Dans une seconde série d'études, le rôle du CO_2 dans les réponses thermorégulatrices à une charge thermique interne en altitude a été abordé (15). Deux sujets caucasiens étaient chacun soumis à deux protocoles ne différant que par la qualité du mélange gazeux inspiré : l'air ambiant ou un mélange enrichi en CO_2 de manière à rétablir une pression alvéolaire de CO_2 voisine de 37 torrs. Dans les deux cas, les réponses thermorégulatrices étaient obtenues au repos et pour des puissances d'exercice de 50 à 80 watts développées pendant 25 minutes dans une ambiance à température constante ($27^\circ C$).

Les résultats obtenus montrent que, au repos, l'inhalation de CO_2 ne modifie pas le gradient thermique noyau-périphérie. A l'exercice par contre on observe une réduction de ce gradient par rapport à ce qui est noté en ambiance normale. Ceci est en bonne corrélation avec une augmentation du débit sanguin cutané avec le CO_2 : la température cutanée reste plus élevée, la température centrale augmente moins, le stockage thermique est réduit. Il est probable que l'augmentation de la pression partielle de CO_2 modifie le gain

du système de la commande sudorale puisque la pente de la relation entre le débit sudoral et la température centrale (valeurs de repos et d'exercice) augmente chez les sujets inhalant un mélange enrichi en CO_2 .

B- EFFET D'UNE CHARGE THERMIQUE EXTERNE IMPORTANTE

Au cours d'une exposition à la chaleur chez l'homme, on observe une augmentation de la ventilation pulmonaire (13, 14). Cette hyperventilation peut conduire à l'hypercapnie, l'alcalose et entraîner une symptomatologie clinique d'accompagnement. Chez l'homme, au repos, lorsque la charge thermique est importante, l'hypocapnie et l'alcalose peuvent représenter des facteurs limitant non négligeables de la tolérance thermique. Pour vérifier cette hypothèse, et compte-tenu des conditions d'altitude qui peuvent sensibiliser ou majorer les réponses observées au niveau de la mer, une étude comparative du temps de tolérance à une charge thermique externe majeure a été réalisée.

Protocole et méthodes

Deux groupes de sujets volontaires et instruits sur l'expérimentation ont été étudiés dans leur environnement d'origine : cinq sujets amérindiens à LA PAZ (3800 m), huit sujets caucasiens à LILLE (20 m) (8, 9). Chaque sujet était soumis à deux charges thermiques identiques à une semaine d'intervalle. Au cours de la première exposition, l'évolution spontanée (conditions -I-) permettait de déterminer le temps de tolérance du sujet ; au cours de la seconde, on compensait l'hypocapnie liée à l'hyperthermie en faisant inspirer au sujet un mélange enrichi de CO_2 : $\text{FICO}_2 = 3,5 - 4 \%$ (conditions -II-) et le temps de tolérance était à nouveau déterminé. Pendant l'expérience, le sujet en maillot de bain, couché sur un treillis à mailles larges, respirait à travers un masque oro-nasal. Un dispositif permettait de modifier facilement FICO_2 à FIO_2 constante.

Après une période initiale de contrôle, le sujet était soumis à la charge thermique qui était généralement interrompue à sa demande lorsqu'il estimait ne plus pouvoir la supporter.

Dans ces conditions, la durée d'exposition représentait le temps de tolérance spontané du sujet. Quatre rampes de lampes à rayonnement infra-rouge d'une puissance totale de 5 000 watts disposées autour du sujet permettaient la réalisation de la charge thermique.

Les températures ambiantes (sèche et humide) et celles du sujet (oesophagienne ($T_{\text{œ}}$), cutanée moyenne (\bar{T}_s) à partir de dix thermocouples cutanés (10) étaient enregistrées toutes les deux minutes ; le volume ventilé toutes les minutes ; la fréquence ventilatoire et l'E.C.G. en continu. Un cathéter intra-huméral à demeure permettait un échantillonnage sanguin artériel avant la charge thermique et à la fin de celle-ci pour déterminer les PaCO_2 , PaO_2 et le pH artériel.

Résultats et discussions

La limite "subjective" de tolérance du sujet coïncide le plus souvent avec des signes objectifs traduisant cette limitation (tétanie, fréquence cardiaque supérieure à 170/min, etc..).

Quelles que soient les modalités expérimentales (conditions I ou II) et les origines des sujets, les températures finales cutanées moyennes et oesophagiennes ne varient qu'entre des limites étroites ($40 < \bar{T}_s < 40,4^\circ \text{C}$ et $38,8 < T_{\text{œ}} < 39,3^\circ \text{C}$; tableau -II-). Ces valeurs paraissent conjointement déterminer, dans les conditions de la charge thermique, un seuil de tolérance.

Une hyperventilation est observée dans les deux groupes de sujets en évolution spontanée. Chez les résidents en altitude, l'hyperventilation d'origine thermique est en partie liée à une augmentation de la fréquence ventilatoire, contrairement à ce que l'on observe pour les sujets caucasiens qui

Conditions	Amérindiens		Caucasiens	
	I	II	I	II
\bar{T}_s initiale	34,7 \pm 0,6	34,8 \pm 0,7	33,4 \pm 0,9	33,6 \pm 0,6
\bar{T}_s finale	40,4 \pm 0,6	40,2 \pm 0,7	40,0 \pm 0,6	40,2 \pm 0,4
Toe initiale	37,0 \pm 0,3	37,0 \pm 0,3	36,7 \pm 0,3	36,7 \pm 0,2
Toe finale	38,8 \pm 0,3	39,0 \pm 0,5	39,2 \pm 0,6	39,3 \pm 0,4

Tableau -II- Températures cutanées moyennes et oesophagiennes initiales (avant l'établissement de la charge thermique) et finales (à l'arrêt de la charge thermique).

Condition -I- : évolution

Condition -II- : hypocapnie compensée.

modifient essentiellement leur volume courant (13, 14) (tableau -III-).

Il est possible que la montée thermique centrale beaucoup plus rapide chez les résidents en altitude que chez les sujets caucasiens (respectivement 4°15 C/heure et 2°5 C/heure) favorise cette augmentation de fréquence.

Conditions		Caucasiens		Amérindiens	
		I	II	I	II
Fréquence respiratoire/mm	initiale	16 \pm 2	16 \pm 2	19 \pm 2	19 \pm 2
	finale	18 \pm 4	20 \pm 4	38 \pm 12	35 \pm 5
Volume courant L.m ⁻² BTPS	initial	0,36 \pm 0,09	0,39 \pm 0,09	non	0,6 \pm 0,16
	final	0,70 \pm 0,15	1,07 \pm 0,3	obtenus	1,0 \pm 0,25

Tableau -III- Evolution de la fréquence ventilatoire et du volume courant chez les sujets des deux groupes avec (conditions -II) ou sans (conditions -I-) correction de l'hypocapnie.

L'hyperventilation entraîne une hypocapnie importante chez les sujets des deux groupes (tableau -IV-). On ne retrouve pas chez les amérindiens, l'augmentation corrélative de la PaO₂ observée chez les caucasiens. Un trouble de la diffusion alvéolo-capillaire, peut-être lié à une majoration de l'hypertension artérielle pulmonaire, pouvait être envisagé pour expliquer ce résultat. Cependant des données hémodynamiques récentes obtenues à LA PAZ dans des conditions expérimentales similaires, montrent que la pression artérielle pulmonaire décroît au cours du stress thermique.

Au cours de la deuxième exposition à la chaleur, la compensation de l'hypocapnie permet de rétablir la PaCO₂ à une valeur non statistiquement différente de la valeur initiale.

Les temps de tolérance moyens observés au cours de l'exposition à la chaleur sans, ou avec compensation de l'hypocapnie, sont respectivement pour les deux groupes :

amérindiens : 26,2 \pm 4,9 min et 36,5 \pm 10,1 min (P 0,01)
caucasiens : 60,8 \pm 12,8 min et 64,6 \pm 11,5 min (NS).

Conditions		Caucasiens			Amérindiens		
		I	II		I	II	
P CO ₂ Torrés	initiale	39,3	40,9	(NS)	30,3	29,5	(NS)
	finale	28,5 (P 0,01)	36,8 (NS)	(P 0,01)	25,1 (P 0,01)	28,2 (NS)	(NS)
P O ₂ Torrés	initiale	97,1	100,2	(NS)	60,2	61,8	(NS)
	finale	109,2 (P 0,01)	121,2 (P 0,01)	(P 0,05)	58,6 (NS)	74,4 (P 0,001)	(P 0,001)
pH	initial	7,39	7,39	(NS)	7,46	7,44	(NS)
	final	7,49 (P 0,01)	7,41 (NS)	(P 0,05)	7,51 (P 0,05)	7,46 (NS)	(NS)

Tableau -IV- Evolution des PO₂, PCO₂ et pH artériels. Les données statistiques correspondent aux couples de résultats : conditions -I- et -II- et valeurs initiales - finales.

Ces résultats montrent que : a) il existe une tolérance spontanée plus grande chez les sujets caucasiens dans les conditions de l'expérimentation b) la compensation de l'hypocapnie augmente le temps de tolérance du sujet résident en altitude mais modifie peu celle du caucasien au niveau de la mer.

Deux ordres de facteurs peuvent favoriser la différence observée dans les temps de tolérance spontanée des deux groupes. D'une part, biométriquement, le rapport surface-volume plus élevé chez les amérindiens accroît la charge thermique effective ; d'autre part, les températures initiales profondes et superficielles plus élevées chez les résidents en altitude impliquent un stockage thermique initial supérieur et une marge de stockage réduite.

Par ailleurs, l'hypocapnie liée à l'hyperventilation modifie le débit cutané sanguin déjà réduit en conditions normoventilatoires d'altitude (5). L'hypocapnie de surcroît favorise la réduction du débit sudoral (11, 15, 1). Il est vraisemblable que ces différents facteurs, visant à réduire les pertes de chaleur vers l'ambiance ainsi que la conductance physiologique rendent compte en partie de la limitation du temps de tolérance, du stockage thermique instantané plus important, et de la rapide élévation thermique du noyau chez le résident d'altitude. Enfin l'hypocapnie majorée par l'hyperventilation chez ce dernier peut entraîner une réduction notable du débit sanguin cérébral (12) ; ceci pourrait faciliter l'apparition des phénomènes subjectifs d'accompagnement de la montée thermique et favoriser la décision d'abandon.

La compensation de l'hypocapnie d'origine thermique accroît significativement (P 0,01) la tolérance thermique du résident d'altitude. L'élévation du débit sudoral et de la conductance physiologique par rapport aux conditions hypocapniques sont probables mais difficiles à évaluer dans les conditions de l'expérimentation. Chez les sujets caucasiens, la compensation d'une hypocapnie déjà réduite par rapport aux conditions d'altitude n'augmente pas significativement la tolérance thermique. Les capacités physiques d'échanges de chaleur et les modalités thermorégulatrices en général sont donc peu modifiées par l'hypocapnie d'origine hyperthermique au niveau de la mer.

CONCLUSIONS GENERALES.

On observe de nombreux ajustements des processus impliqués dans la régulation thermique au chaud chez les sujets résidents en altitude ou les transplantés en altitude par rapport au niveau de la mer. En raison des adaptations à long terme développés chez les amérindiens, ces ajustements sont en général majorés chez les transplantés.

En ce qui concerne le transfert de chaleur noyau-périphérie, la réduction du débit sanguin cutané en altitude entraîne, pour un transfert calorique équivalent, un élargissement nécessaire du gradient thermique noyau-peau.

La température centrale reste plus élevée en altitude quel que soit le sujet par rapport aux valeurs du niveau de la mer. Inversement, on observe une réduction de la température cutanée particulièrement marquée chez le caucasien en altitude.

Les échanges vers l'ambiance sont également modifiés en fonction de la baisse de pression barométrique. La diminution des échanges par convection-radiation est compensée dans la lutte contre une charge thermique par un accroissement des pertes de chaleur par évaporation.

Enfin, le facteur hypocapnique joue un rôle non négligeable dans l'expression de la fonction thermorégulatrice. Son rôle dans l'ajustement vasomoteur périphérique et cérébral ainsi que dans la modulation des pertes par évaporation explique en partie l'amélioration observée des capacités de lutte contre le chaud, lors des compensations de l'hypocapnie d'altitude spontanée ou majorée par une hyperventilation d'origine hyperthermique.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- ALPERT R.E. - Sweat suppression by forced breathing in man.
J. Appl. Phys. 1965, 20, 134-136.
- 2- ASSMUSSEN E., NIELSEN M. - The regulation of the body temperature during work performed with the arms and with the legs.
Acta Physiol. Scand. 1947, 14, 373-383.
- 3- COLIN J., HOUDAS Y., BOUTELIER C. - Déterminations expérimentales de la surface effective de radiations thermiques chez l'homme.
C.R. 1966, 262, 1966-1969.
- 4- COLIN J., TIMBAL J., BOUTELIER C. - Influence de la charge thermique externe sur les coefficients utilisés dans le calcul du stockage de chaleur.
J. Physiol. Paris, 1970, 62, suppl. 2, 263.
- 5- DURAND J., MARTINEAUD J.P. - Resistance and capacitance vessel of the skin in residents and sejourners at high altitude. in Cuba Foundation Symposium on High Altitude Physiologie Cardiac and Respiratory aspects, PORTER R. and KNIGHT J. Edit. 1971, 159-170.
- 6- GAUDIO R., ABRAMSON N. - Heart-induced hyperventilation
J. Appl. Physiol. 1968, 25, 742-746.
- 7- GREENLEAF J., GREENLEAF C., CARD D. , and SALTIN B. - Exercise temperature regulation in man during acute exposure to simulated altitude
J. Appl. Physiol. 1969, 26, 290-296.
- 8- GUIEU J.D., COUDERT J., VARENE P. - Tolerance to heat stress in resting man at high altitude : hypocapnia as a limiting factor.
Int. J. Meteorol. 1975, 19, suppl. 19.

- 9- GUIEU J.D., HARLE F., HOUDAS C., HURTEVENT J.F., VARENE P. - Effets de la compensation de l'hypocapnie ventilatoire d'origine thermique sur la tolérance à la chaleur chez l'homme au repos au niveau de la mer
J. Physiol. Paris, 1975, 71, 335 A.
- 10- HARDY J.D., DUBOIS E. - The technique of measuring radiation and convection
J. Nutr. 1938, 15, 461-475.
- 11- HOUDAS Y., BONAVENTURE M., SAUVAGE A., HOUDAS C., GINESTET A. - Quantitative influence of CO₂ inhalation on thermal sweating in man
Aerospace Med. 1973, 44, 265-268.
- 12- MARC-VERGNES J.P. - Circulation et métabolisme du cerveau, équilibre acido-basique du L.C.R. chez le résident d'altitude.
Thèse Doctorat Biologie Humaine, Paris 1974.
- 13- MARTINEAUD J.P., DURAND J., COUDERT J., SEROUSSI S. - La circulation cutanée au cours de l'adaptation à l'altitude.
Arch. Ges. Physiol. 1969, 310, 264-176.
- 14- NIELSEN B., NIELSEN M. - Influence of passive and active heating on the temperature regulation in man.
Acta Physiol. Scand. 1965, 64, 323-331.
- 15- RAYNAUD J., VARENE P., VIEILLEFOND M., DURAND J. - Circulation cutanée et échanges thermiques en altitude (3800 m)
Arch. Sci. Physiol. 1973, 27, 247-254.
- 16- SAXTON C. - Respiratoir during heat stress
Aviat. Space Environ. Med. 1975, 46, 41-46.
- 17- VARENE P., JACQUEMIN C., DURAND J., RAYNAUD J. - Energy balance during moderate exercise at altitude.
J. Appl. Physiol. 1973, 34, 633-638.

SUMMARY - The study deals with aspects of the temperature regulation in men native to or transplanted into a high altitude environment, at rest or exercising. In a previous study, the effects of a moderate internal heat thermal heat strain (25 min. of sub-maximal exercise, 53 W.m⁻²) were compared in highlanders and lowlanders at high altitude. Core temperature increases similarly in both groups whereas mean skin temperature increases in highlanders and decreases in lowlanders. The energy balance calculated from partitioned calorimetry shows a heat storage in both groups but the evaporative heat loss was higher and the radiant convective losses lower in the unacclimated group. Thus the thermoregulatory processes allow achievement of the same thermal equilibrium but through different heat dissipating mechanisms. In the unacclimatized subjects, altitude seems to affect the set-value of sweating but the gain of the sweating drive depends on the ambient temperature.

In a second study, the effect of hypocapnia induced by hyperventilation during heat stress on tolerance time to heating was observed and compared in Indians at altitude and Caucasians at sea level. Both groups were submitted twice to the same radiant heat stress at rest, either breathing ambient air or breathing a gas mixture enriched with CO₂ to cancel the hypocapnia. With CO₂, the tolerance time was increased by 40% in Indians while no significant difference occurred in the tolerance time of the Caucasians. The increased tolerance in Indians might be linked to increased sweating and better cerebral blood flow.