



HAL
open science

Expérience Sagitaire I

Sa Comex

► **To cite this version:**

| Sa Comex. Expérience Sagitaire I. COMEX. 1972. hal-04463597

HAL Id: hal-04463597

<https://hal.univ-brest.fr/hal-04463597>

Submitted on 17 Feb 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



The present document is the property of COMEX SAS. It has been entrusted to the ORPHY laboratory, which scanned and uploaded it.

COMEX (Compagnie Maritime d'Expertises), established in 1962, has positioned itself in the offshore activities sector, where it held a leading international position, becoming the world's foremost company in engineering, technology, and human or robotic underwater interventions. Comex designed a Hyperbaric Testing Center in 1969 and developed its own research programs on various breathing mixtures used in deep-sea diving (helium and later hydrogen). These research efforts led to spectacular advancements in this field, including several world records, both in real conditions and simulations. Comex still holds the world record at -701 meters, achieved in its chambers during Operation HYDRA 10.

The ORPHY laboratory focuses on major physiological functions, their regulation, interactions, and their contribution to the development and prevention of certain pathologies. The primary mechanisms studied involve metabolic aspects (oxygen transport and utilization, energetics, etc.) and electrophysiological aspects (contractility and excitability), mainly related to respiratory, vascular, and/or muscular functions. These mechanisms are studied under various physiological and physiopathological conditions, ranging from the cellular and subcellular levels to the entire organism. In Europe, the ORPHY laboratory is one of the leaders in hyperbaric physiology and diving research.

Being a major player in innovation and expertise in the field of pressure, COMEX maintains a scientific archive from its experimental diving campaigns. The value of this archive is both scientific and historical, as it documents a remarkable chapter in the history of marine exploration and contains results obtained during dives that are very unlikely to be replicated in the future.

CENTRE D'ESSAIS EN VOL
LABORATOIRE DE MEDECINE AEROSPATIALE

COMPTE RENDU D'ETUDE N° 978

EXPERIENCE SAGITTAIRE I :
LE BILAN THERMIQUE DES PLONGEURS EN ATMOSPHERE HELIUM OXYGENE
(CONTRAT CEV/CNEXO n° 70/ 244)
(Rapport de fin de contrat)

Date : octobre 1972.

CENTRE D'ESSAIS EN VOL

LABORATOIRE DE MEDECINE AEROSPATIALE

Code d'Essais C.E.V. : 71 506

SUJET :

Expérience Sagittaire I : Le bilan thermique
des plongeurs en atmosphère Hélium-Oxygène.
(Contrat CEV/CNEXO n° 70 244)
Rapport de fin de contrat.

par :

Section Hautes Altitudes :

- Médecin en Chef de 2ème classe P. VARENE
Professeur Agrégé du Service de Santé
des Armées.
- Médecin de 2ème classe H. VIEILLEFOND
Assistant de Recherche du Service de
Santé des Armées.
- Médecin Aspirant H. GUENARD
- Docteur J. L'HUILLIER
Chargé de Recherche de l'INSERM
- Technicien : Monsieur PEYROT.

Section Bioclimatologie :

- Médecin de 1ère classe J. TIMBAL
Professeur Agrégé du Service de Santé
des Armées.
- Techniciens : Monsieur Pierre BERNAUX
Monsieur Claude CHARGE.

// O M M A I R E

I. - AVANT PROPOS	page 1
II.- DONNEES THEORIQUES - METHODOLOGIQUES et BIBLIOGRAPHIQUES	" 3
2.1. - Généralités	" 3
2.2. - Métabolisme	" 3
(Tableau I)	
2.3. - Pertes thermiques par évaporation	" 9
2.4. - Echanges thermiques par radiation	" 10
2.5. - Modifications de l'état thermique du corps : stockage ou dette de chaleur	" 11
2.6. - Echanges thermiques par convection	" 12
2.6.1. - Echanges thermiques par convection respi- ratoire	" 12
(Tableau II)	
2.6.2. - Echanges thermiques par convection cutanée	" 14
2.7. - Conclusions	" 16
III. - TECHNIQUES ET PROTOCOLE	" 17
3.1. - Techniques de mesure	" 17
3.1.1. - Mesure des températures	" 17
3.1.1.1. - Températures sèche, parois, rectale, cutanées	" 17
3.1.1.2. - Température des gaz inspirés et expirés	" 18
(Figure 1)	
3.1.2. - Mesure des échanges gazeux	" 21
(Tableau III)	
3.1.3. - Mesure des variations de poids	" 27
3.2. - Protocole	" 27
(Tableaux IV - V et VI)	
IV. - RESULTATS	" 34
4.1. - La température rectale.....	" 34
(Tableau VII)	
4.2. - La température cutanée moyenne	" 35
(Tableaux VIII et IX)	

4.3.	- Le stockage ou la dette thermique	page 37
	(Tableaux X et XI)	
4.4.	- Les échanges gazeux	" 39
4.4.1.	- Les variables métaboliques (\dot{V}_{O_2} , \dot{V}_{CO_2} , R)	" 39
	(Tableaux XII et XIII - figures 2 et 3)	
4.4.2.	- Les variables ventilatoires (\dot{V}_E , \dot{V}_A , P_{ACO_2})	" 43
	(Tableau XIV - figures 4 et 5)	
4.5.	- Les pertes thermiques par radiation	" 47
	(Tableaux XV et XVI)	
4.6.	- Les pertes thermiques par évaporation	" 48
	(Tableau XVII)	
4.7.	- Les pertes thermiques par convection respiratoire	" 49
	(Tableaux XVIII - XIX et XX - figure 6)	
4.8.	- Les pertes thermiques par convection cutanée	" 54
	(Tableaux XXI et XXII)	
V.-	DISCUSSION	" 56
5.1.	- Données ventilatoires	" 56
	(Figure 7)	
5.2.	- Données métaboliques	" 59
	(Tableau XXIII)	
5.3.	- Confort thermique en hyperbarie	" 62
5.4.	- Echanges thermiques par convection cutanée :	
	Détermination du coefficient d'échanges thermiques	
	par convection h_c	" 63
	(Tableaux XXIV - XXV - XXVI et XXVII -	
	Figures 8 - 9 - 10 - 11 - 12 et 13).	
5.5.	- Effets de l'inhalation de gaz froids	" 72
	(Tableaux XXVIII et figure 14)	
VI. -	CONCLUSIONS	" 76
	BIBLIOGRAPHIE	" 78

I. - AVANT - PROPOS -

Il suffit de constater le haut niveau auquel la température intérieure des caissons hyperbares doit être maintenue, à la demande des sujets d'expérience, pour conclure que dans les conditions de la plongée profonde en atmosphère Hélium-Oxygène les échanges thermiques de l'organisme sont considérablement accrus. En mer le maintien des plongeurs en bonne condition physique nécessite, l'expérience l'a montré, la mise en oeuvre de vêtements chauffants et d'un système de réchauffage des gaz inspirés.

Les lois physiques de l'écoulement thermique montrent que ces modifications sont à rapporter à deux causes principales : la pression en elle-même qui accroît la masse volumique, la présence d'hélium dont la conductibilité thermique est en gros six fois plus élevée que celle de l'azote. Cependant, si les lois physiques permettent de prévoir le sens d'évolution des variables d'échange elles n'autorisent qu'une prévision quantitative très grossière des phénomènes dans le cas particulier de l'organisme humain.

En effet, les échanges thermiques s'effectuent principalement à travers la peau et à un moindre degré au niveau de l'arbre trachéo-bronchique. Ces deux organes du fait de leur géométrie et de leurs fonctions complexes ne se prêtent pas aisément, dans le cas particulier, à des déterminations théoriques. Une telle évaluation ne peut donc être qu'expérimentale.

A côté de l'intérêt qu'elle présente pour la physiologie fondamentale, l'estimation quantitative de tous les éléments du bilan thermique du plongeur vise un double but, à savoir permettre une meilleure adaptation du matériel de protection à mettre en oeuvre dans les plongées actuelles et autoriser une prévision pour les plongées futures à très grande profondeur.

C'est dans cette optique qu'une équipe de physiologistes du Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol a entrepris sous contrat du Centre National d'Exploitation des Océans l'expérimentation dont les résultats sont rapportés ci-dessous. Cette expérience a eu lieu dans les caissons du Centre de Barobiologie de la Compagnie Maritime d'Expertise à Marseille au mois de novembre 1971.

Les grandes lignes du projet ont été mises au point conjointement avec le Docteur FRUCTUS et Monsieur AGARATE, représentants de la COMEX, qui assuraient la coordination entre les différentes équipes de chercheurs participant à l'expérience Sagittaire I, chacune d'un point de vue particulier.

En ce qui concernait l'étude du bilan thermique effectuée par le Laboratoire de Médecine Aérospatiale du Centre d'Essais en Vol, il a été nécessaire de mettre en place des moyens relativement importants après une préparation d'environ 6 mois. De ce point de vue, le personnel ayant assuré la préparation, le déroulement de l'expérience et son exploitation, a réuni 5 médecins et 3 techniciens appartenant à deux sections du LAMAS, la Section Hautes Altitudes (Pr. VARENE), la Section de Bioclimatologie (Pr. TIMBAL). Le matériel destiné aux différentes mesures représentant environ 500 kgs a été transporté par voie aérienne grâce aux soins du Centre d'Essais en Vol.

II. - DONNEES THEORIQUES METHODOLOGIQUES ET BIBLIOGRAPHIQUES

2.1. - Généralités

La compréhension du mécanisme des échanges thermiques de l'homme en milieu Hélium-Oxygène hyperbare nécessite l'étude analytique des composantes de la balance énergétique. Les termes du bilan sont reliés de façon simple par l'équation suivante :

$$M - W \pm R \pm C \pm K - E = \pm S \quad (1)$$

où :

M = Métabolisme du sujet, toujours positif.

W = Energie fournie au milieu extérieur sous forme de travail, toujours négatif.

R = Echanges thermiques par radiation, positif, négatif ou nul

C = " " par convection " " "

K = " " par conduction " " "

E = Evaporation, toujours négatif

S = Stockage ou dette thermique donc positif, négatif ou nul.

Tous ces symboles représentent des puissances énergétiques (Watt ou Kcal/h) ramenées à l'unité de surface (m²). En pratique, dans ce rapport l'unité utilisée sera le Watt/m².

Dans certaines conditions l'équation ci-dessus se simplifie : lorsque le sujet est au repos, W = 0 et le plus souvent, les échanges par conduction sont négligeables. C'est le cas de l'expérience actuelle ou l'on peut écrire :

$$M \pm R \pm C - E = \pm S \quad (2)$$

Chacun des termes de cette équation sera examiné successivement, à la lumière des connaissances antérieures, afin de bien montrer l'intérêt et le cadre de cette étude.

2.2. - Métabolisme (M)

Le métabolisme est généralement mesuré, comme dans nos expériences, par thermochimie respiratoire : mesurant la consommation d'oxygène d'un sujet ($\dot{V}O_2$) et connaissant l'équivalent énergétique de l'unité de volume d'oxygène ξ on calcule la production d'énergie de l'organisme. En l'absence de travail musculaire cette énergie est supposée intégralement transformée en chaleur, (Equation 2).

/...

Il est envisageable que l'hyperbarie puisse modifier ce métabolisme, soit au niveau cellulaire, soit au niveau de l'organisme entier du fait ou bien de l'accroissement de pression totale ou bien de l'accroissement des pressions partielles des différents gaz présents dans le mélange gazeux ambiant. La revue de la littérature fournit en la matière un certain nombre d'éléments :

a/ - En effet on peut penser que la composition du gaz ambiant et sa pression interviennent dans le métabolisme cellulaire.

Pour une pression donnée, l'activité des différents enzymes est perturbée de manière variable selon la nature du gaz neutre employé. (FEATHERSTONE et Coll. 1971). L'augmentation de pression ne fait que majorer ces effets qui sont difficilement mesurables, pour des pressions inférieures à 67 Ata (d'après LANDAU 1971). Pour des pressions supérieures, une diminution de l'incorporation des acides aminés est constatée. Les mécanismes de ces perturbations biochimiques sont soupçonnés bien que mal connus. Trois types de mécanisme peuvent être incriminés :

- L'élévation de pression hydrostatique accroît la stabilité des structures colloïdales et provoque l'agrégation des monomères (AOKI et Coll. 1968).

- L'augmentation, avec la pression ambiante, de la pression partielle du gaz neutre, qui entraîne une augmentation de la concentration de ce gaz dans le milieu cellulaire (la concentration est aussi fonction de la solubilité du gaz dans le milieu) (loi de HENRY).

- Les caractéristiques physicochimiques du gaz (dont quelques unes sont rappelées pour l' N_2 et l' H_2 à la partie haute du tableau I). L'hélium semble se comporter comme un gaz neutre de même que le néon alors que le krypton et le xénon forment avec le milieu des liaisons plus ou moins lâches, en particulier du type VANDERWAALS (ROTH 1966).

b/ - Le bilan énergétique global, donc le métabolisme est conditionné par cet aspect cellulaire et de plus par les échanges énergétiques qui sont fonction des propriétés physiques du gaz ambiant pour un niveau d'activité donné.

/...

A ce sujet quelques caractéristiques de l'He et de l' N_2 sont rappelées à la partie basse du tableau 1. La conductibilité thermique et la viscosité cinématique élevées de l'hélium sont remarquables. La détermination théorique de ces paramètres, fait appel à la théorie cinétique des gaz.*

L'augmentation de la masse volumique des gaz avec la pression, conduit à une augmentation des échanges thermiques par conduction et par convection pour une température opérative donnée.

* - Rappelons que la théorie cinétique de gaz prévoit que pour un gaz monoatomique (MARKHAM et Coll. 1941, MASON et Coll. 1958, SRIVASTAVA et Coll. 1960, BROKAW 1964, etc...)

$$k = \frac{1}{3} \lambda \bar{u} \rho C_p$$

où : k = conductibilité thermique
 λ = libre parcours moléculaire moyen
 \bar{u} = vitesse moléculaire moyenne
= masse volumique
 C_p = chaleur spécifique

et :

$$\nu = \frac{1}{3} \lambda \bar{u} \quad (\text{viscosité cinématique ou diffusivité interne})$$
$$\eta = \frac{1}{3} \lambda \bar{u} \rho \quad (\text{viscosité dynamique}).$$

- T A B L E A U I -

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DE L'He ET DE L'N₂

	Coefficient de solubilité dans l'eau à 38°C $\text{dm}^3(\text{STPD})/\text{dm}^3\text{H}_2\text{OAta}^{-1}$	Rapport des coefficients de solubilité huile-eau	Diffusion relative dans la gélatine à 23°C	Coefficient de diffusion $\text{cm}^2\text{s}^{-1}\times 10^{-6}$ à 37°C	
				huile	eau
He	0,0086	1,7	1	18,60	79,2
N ₂	0,013	5,1	0,36	7,04	30,1

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'He ET DE L'N₂

	Masse volumique $\text{g. dm}^{-3}(\text{STPD})$	Chaleur spécifique $\text{J. }^\circ\text{K}^{-1}\text{.mole}^{-1}$	Conductibilité thermique $10^{-3}\text{W. m}^{-1}\text{.}^\circ\text{K}^{-1}$	Viscosité	
				dynamique $\text{Pl. } 10^{-6}$	cinématique $\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{. } 10^{-10}$
He	0,1784	20,77	147,14	18,9	106,14
N ₂	1,257	29,09	24,24	16,7	13,88

Le métabolisme, en milieu He, O₂, a été étudié dans trois circonstances, selon les données de la littérature :

- tissus isolés et embryons,
- petits mammifères,
- homme.

Les premiers résultats sur tissus isolés furent rapportés par COOK et GIRAGOSSINZ (1931) qui observèrent une diminution de la consommation d'oxygène lorsque la pression ambiante baisse à P_{O₂} constante. D'après les travaux de MAIO et NEVILLE (1966) la présence d'azote dans l'air diminue de 42 % la consommation d'O₂ par rapport à un milieu avec 100 % d'O₂ à 1/5 d'Ata. Ces résultats ne sont pas confirmés par RODGERS, FENN et CRAIG (1969).

En milieu He-O₂ les premiers résultats furent donnés par COOK, SOUTH et YOUNG (1951 et 1953). Ceux-ci trouvent une augmentation de la consommation d'O₂ à 1 Ata par rapport à l'air. Ces résultats ne sont pas confirmés par ceux de RODGERS et Coll. (1969) pour des pressions de 0,2 à 4,6 atm. en milieu He-O₂ à P_{O₂} constante. Par ailleurs pour ces auteurs l'augmentation de P_{O₂} jusqu'à 1 Ata, ne change pas les consommations d'oxygène.

- WEISS et Coll. (1965) constatent que la croissance de l'embryon du poulet est ralentie en milieu He-O₂ (Perte de 27 % du poids par rapport aux témoins). Après l'éclosion les poussins ont une croissance similaire mais ceux qui sont élevés en milieu He-O₂ ont des entrées énergétiques 16 % plus fortes que celles des témoins en Air. Ceci est dû d'après les auteurs à l'accroissement des pertes énergétiques, tous les poussins étant à la même température ambiante.

- Les résultats des études métaboliques sur les petits mammifères, montrent tous une élévation de la consommation d'oxygène en présence d'He-O₂ (COOK et coll. 1951). LEON et COOK (1960) interprètent cette élévation comme une compensation de l'augmentation des pertes énergétiques par conduction - convection. La conductibilité thermique de l'hélium étant six fois plus élevée que celle de l'air. Ceci a été confirmé par de nombreux auteurs, en particulier RHOADES et Coll. (1967).

- Chez l'homme toutes les expériences donnent des résultats comparables à ceux des petits animaux homéothermes (BOWERS et Coll. 1967, RAYMOND et Coll. 1968, OVERFIELD et Coll. 1969, SALTZMAN et Coll. 1971). Mais les conditions d'expériences sont telles qu'il est rarement

possible de répondre aux questions posées par la mesure des échanges gazeux en plongée.

Pour répondre à ces questions, il faudrait en particulier maintenir au niveau minimum les pertes énergétiques quelle que soit la profondeur, ce qui permettrait d'étudier le métabolisme de base.

BOWERS et FOX étudiant plus particulièrement l'aspect thermique de la plongée, montre qu'en milieu H_e-O_2 à une pression de 1 Ata, si l'on assure une ambiance thermique confortable l' H_e ne modifie pas le métabolisme.

Les expériences de OVERFIELD et Coll. (1969) et SALTZMAN et Coll. (1971) sont plus difficiles à interpréter car il ne semble pas que la neutralité thermique de l'ambiance ait été maintenue.

Dans ces conditions tous les paramètres ventilatoires varient. A ce sujet il est intéressant de remarquer que selon SALTZMAN et Coll. (1971) les paramètres ventilatoires sont en corrélations plus étroites avec la pression ambiante qu'avec la densité du gaz ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, \dot{V}_E , PA_{CO_2} , \dot{V}_D augmentent avec la pression).

L'augmentation de $\dot{V}O_2$ et $\dot{V}CO_2$ qui est faible, est reliée aux pertes thermiques de façon hypothétique car, si le confort thermique des sujets était assuré, le bilan thermique n'a pas été fait. On constate aussi dans ce travail, une élévation du quotient respiratoire qui n'est pas très significative ($p = 0,23$), et une élévation très significative de PA_{CO_2} ($p = 0,0002$).

BROUSSOLLE et Coll. (1972) au cours d'une plongée fictive à 51 Ata en H_e-O_2 trouvent une augmentation de $\dot{V}O_2$ et $\dot{V}CO_2$ avec élévation de R. Malheureusement ces résultats ne paraissent pas cohérents en particulier en ce qui concerne les relations entre $\dot{V}CO_2$, \dot{V}_A et PA_{CO_2} et entre \dot{V}_A et \dot{V}_E .

BOWERS et FOX (1967) admettent néanmoins comme acquis, d'après leurs expériences personnelles, que :

- L'Hélium ne modifie pas le métabolisme cellulaire ;
- Le refroidissement des sujets dépend de la conductibilité thermique élevée de ce gaz.

/...

2.3. - Pertes thermiques par évaporation (E)

L'évaporation entraîne un refroidissement du corps et s'effectue soit au niveau de la peau, soit au niveau des voies respiratoires. Quel que soit la localisation de ce phénomène, les conséquences sur le refroidissement sont les mêmes et dans le cas présent il n'a pas été jugé nécessaire de dissocier la part qui revient à la peau de celle qui revient aux voies respiratoires.

La façon la plus habituelle de l'évaluer consiste à mesurer la perte de poids du sujet et à déduire de cette dernière la variation de poids métabolique. Il suffit ensuite de multiplier cette valeur par la chaleur latente d'évaporation. Depuis les travaux initiaux de MURLIN et BURTON (1935), la chaleur latente d'évaporation de la sueur a été maintes fois discutée (HARDY, 1949 ; MITCHELL et Coll. 1968 ; SNELLEN, 1966 ; SNELLEN et Coll. 1970). En l'absence de données précises en milieu He-O₂ hyperbare, la valeur de 2,42 k joule/g (0,585 kcal/g) a été retenue.

Au cours d'expériences réalisées en milieu confiné hyperbare, l'hygrométrie ambiante est habituellement élevée et constitue une entrave à l'évaporation de l'eau au niveau de la peau. De toutes façons, comme la peau est toujours à une température supérieure à celle de l'ambiance, il ne peut y avoir condensation au niveau de la peau. De plus si l'eau ne s'évapore pas et reste à la surface cutanée, celle-ci sera saturée à la température correspondante et il existera toujours une différence de P_{H_2O} entre la peau et l'ambiance. Tout va dépendre du coefficient d'évaporation que de nombreux auteurs (CLIFFORD et Coll. 1959 ; WOODCOCK et Coll. 1956) considèrent comme étant le double du coefficient d'échange thermique par convection en conditions normobares. Il n'est pas possible d'extrapoler ces données aux conditions hyperbares et par conséquent de prévoir un accroissement du pouvoir évaporatoire de l'ambiance parallèlement à l'accroissement attendu (cf. chap. 2-6-2) du coefficient d'échange par convection.

En fait, pour des expériences au repos complet, au voisinage de la neutralité thermique, le plus souvent d'ailleurs en "confort frais" (cf. chap. 4-4-3), il n'existe pas de sudation et les pertes hydriques se limitent à la seule perspiration. On peut donc penser que même avec une hygrométrie relativement élevée son évaporation peut s'effectuer en totalité.

/...

Par contre, dans une situation expérimentale comportant une contrainte thermique importante, comme dans le cas du travail musculaire, la sudation peut survenir. Dans ce cas, le problème de l'évaporation reste entier et il est pour le moment impossible d'en prévoir les limites.

Les pertes hydriques par les voies respiratoires sont en relation avec la différence des pressions de vapeur d'eau entre les gaz inspirés et expirés. Avec une hygrométrie élevée, les pertes thermiques par cette voie seront donc obligatoirement diminuées (cf. infra 2-6-1).

2.4. - Echanges thermiques par radiation (R)

Les lois physiques d'échange thermique par radiation sont bien connues et appliquées à l'homme, dans des conditions satisfaisantes, par les méthodes de calorimétrie fractionnelle. Pratiquement, on peut prévoir que les échanges par radiation ne seront pas modifiés par l'augmentation de la pression et la présence d'Hélium dans le domaine exploré par l'homme. Toutefois dans certains cas particulier où le taux de CO₂ et de vapeur d'eau atteint des valeurs élevées, l'absorption du rayonnement I.R., pourrait éventuellement être discutée. Ces échanges s'expriment par l'équation suivante :

$$R = k \cdot e_s \cdot e_w \cdot \frac{A_R}{A_D} (T_W^4 - \bar{T}_S^4) \quad (3)$$

k = Cte de STEFEN BOLTZMANN = $5,77 \cdot 10^{-8}$ Watt/m²·°K⁴

e_s = émissivité de la peau sans dimension

e_w = émissivité des parois "

A_R = surface d'échange par radiation en m²

A_D = surface totale du corps en m², évalué à partir des tables de Dubois.

T_W = Température des parois environnantes en °K

\bar{T}_S = Température cutanée moyenne en °K

Dans le cas présent les parois de la sphère étant recouvertes d'une peinture mate l'émissivité a été considérée comme égale à 1. De même la valeur de l'émissivité de la peau a été assimilée à 1. (HARDY, 1949, MITCHELL, 1972).

Le rapport des surfaces : A_R/A_D , dépend de la position du corps. En reproduisant rigoureusement celle adoptée par COLIN et Coll. (1966); une valeur de 0,84 a été utilisée.

/...

Si les lois de la radiation restent identiques, cela ne signifie pas obligatoirement que ce type d'échange ne sera pas quantitativement modifié en milieu hyperbare. Tout dépend, en effet, de la différence de température entre la peau et les parois environnantes. Comme en général dans les expériences rapportées $TW < TS$ il s'agit d'une perte thermique. Plus la différence entre les deux sera grande et plus les pertes seront importantes et vice versa. RAYMOND et Coll. (1968), ont noté au cours d'une expérience jusqu'à 14,6 ATA, une diminution de ces échanges avec la pression. Mais cette diminution était en rapport avec le réchauffement de l'ambiance, c'est à dire une diminution de l'écart thermique entre la peau et les parois, et non à une quelconque modification des lois d'échange par radiation.

2.5. - Les modifications de l'état thermique du corps :

Stockage ou Dette de chaleur (S)

La détermination de l'état thermique du corps et de ses variations, est l'un des problèmes fondamentaux de la calorimétrie fractionnelle. Hormis les méthodes de calorimétrie directe (ATWATER et BENEDICT 1905), malheureusement inutilisables dans la pratique courante et tout spécialement dans le cas présent, il est très difficile d'évaluer la dette ou le stockage de chaleur. Les recherches effectuées en laboratoire ont abouti à l'évaluation de la température moyenne du corps à partir de la mesure d'un certain nombre de températures corporelles, habituellement, température interne (rectale, oesophagienne ou tympanique) et températures cutanées pondérées par certains coefficients.

Depuis les travaux initiaux de BURTON (1935) on utilise le plus souvent l'équation suivante :

$$T_b = 2/3. T_{re} + 1/3. \bar{T}_s \quad (4)$$

où T_b est la température moyenne du corps.

Bien que ces coefficients de pondération aient été souvent discutés (HARDY et DUBOIS, 1938 ; SNELLEN, 1966 ; STOLWIJK et HARDY, 1966), il semble d'après des travaux récents (COLIN et Coll. 1971) que leur valeur soit acceptable lorsque l'on se trouve au voisinage de la neutralité thermique. Par contre, lorsque l'expérimentation a lieu dans la zone chaude (COLIN et Coll. 1971) ou froide (STOLWIJK et HARDY, 1966 ; GUIEU et Coll., 1968) ces coefficients sont criticables.

/...

C'est la raison pour laquelle, afin de minimiser les erreurs possibles, l'expérimentation actuelle prévoyait de réaliser des ambiances aussi proches que possibles de la neutralité thermique. Dans ces conditions la dette ou le stockage de chaleur, relativement modérés en raison d'une température ambiante à peu près confortable, peuvent être calculés à partir de l'évolution de la température cutanée et rectale selon l'équation.

$$S = (0,66 \Delta T_{re} + 0,34 \Delta T_s) \times \frac{m}{A_D} \times \frac{1}{t} \times C \quad (5)$$

où : m = masse du corps en kg

A_D = surface corporelle en m^2

ΔT_{re} = variation de la T_{re} en $^{\circ}C$ pendant le temps t

ΔT_s = " " de T_s " " " "

C = chaleur spécifique : $3,470 J/^{\circ}C. kg$ ($0,83 kcal/^{\circ}C kg$)

t = temps en seconde

S = dette ou stockage en $watt/m^2$.

2.6. - Echanges thermiques par convection (C)

Il convient de distinguer les échanges par convection respiratoire, des échanges par convection au niveau de la peau. Une telle distinction est habituellement dépourvue d'intérêt pratique étant donné la faible valeur de la convection respiratoire qui n'excède guère $0,5 W/m^2$ au repos. Il n'en va pas de même en milieu hyperbare où il est préférable de dissocier les deux composantes des échanges convectifs. Il s'agit, en général, dans les deux cas, de pertes thermiques puisque la température des gaz de l'ambiance est inférieure à celle du corps (peau ou gaz expirés). Ces deux types de déperdition calorifique déterminés de façon différente sur le plan expérimental, seront examinés successivement au préalable.

2.6.1. - Convection respiratoire : Echanges thermiques par convection respiratoire.

Dans les échanges thermiques respiratoires seuls seront envisagés ici les échanges par convection (Tableau II). Ceci pour deux raisons :

a - les échanges thermiques par évaporation respiratoire ne sont pas fonction de la pression barométrique.

b - l'ensemble des échanges par évaporation, évaporation respiratoire comprise, sont pris en compte par les variations de poids du sujet. (Cf. supra 2-3).

TABLEAU II

ECHANGES THERMIQUES VENTILATOIRES

Evaporation

$$\dot{W}_{ev} = \lambda \frac{\dot{V}_{STPD}}{v_0} (F_{EH_2O} - F_{IH_2O})$$

$$\dot{W}_{ev} = \lambda \left[\dot{V}_{BTPS} \left(\frac{1}{22,4} \cdot \frac{273}{310} \frac{P_B}{760} \right) \right] \left[\frac{P_{EH_2O} - P_{IH_2O}}{P_B} \right]$$

$$\lambda_{25^\circ C} = 43,976 \cdot 10^3 \text{ joules} \cdot \text{mole}^{-1}$$

Convection

$$\dot{W}_{cv} = M_{cp} \frac{\dot{V}_{STPD}}{v_0} (\bar{T}_E - T_I)$$

$$\dot{W}_{cv} = M_{cp} \left[\dot{V}_{BTPS} \left(\frac{1}{22,4} \frac{273}{310} \frac{P_B - 47}{760} \right) \right] (\bar{T}_E - T_I)$$

$$M_{cp} \text{ Air} : 29,19 \text{ joules} \cdot ^\circ C^{-1} \text{ mole}^{-1}$$

$$\text{Helium} : 20,81 \text{ — — — — —}$$

En normobarie ces échanges par convection sont très faibles : 1 % du métabolisme selon CALDWELL et Coll. (1969). En hyperbarie pour un mélange gazeux donné la dissipation par convection s'accroît du fait de l'augmentation de la ventilation ramenée aux conditions standard (\dot{V}_{STPD}). La chaleur spécifique molaire ou massique variant très peu (JACQUEMIN et coll. 1971). Cette question a souvent été évoquée dans des publications consacrées à l'hyperbarie (MINARD 1967, RAWLINS et Coll. 1971, WEBB 1970, BOTTOMLEY et Coll. 1968, etc...) mais généralement pour citer les travaux de WEBB et ANNIS (1966). Une étude de ce problème a été réalisée au L.A.M.A.S. en atmosphère d'air et jusqu'à 5 Ata (VARENE et Coll. 1970). Ce travail nous montrait que quelle que soit la pression ambiante et la ventilation la température des gaz expirés pouvait être représentée par une fonction simple de la température des gaz inspirés ($\bar{T}_E = a + b \bar{T}_I$) recoupant en cela certaines conclusions de Mc CUTCHAN et Coll. (1951) et HOUDAS et Coll. (1966). Cette relation nous permettait de faire une prévision des déperditions thermiques par convection ventilatoire en fonction de la température des gaz inspirés, de la pression, et de la ventilation, prévision applicable au repos ou à l'exercice musculaire léger (L'HUILLIER et Coll. 1970). On peut se demander cependant si une telle relation établie pour l'air serait applicable à une atmosphère d'Hélium, l'écoulement gazeux trachéobronchique devant théoriquement être sensiblement différent dans les deux cas.

2.6.2. - Echanges thermiques par convection cutanée :

Les échanges convectifs entre la peau du sujet et l'ambiance sont d'un abord théorique extrêmement complexe en raison de la multiplicité des facteurs en cause et de leur combinaison. Ces facteurs sont les suivants :

- différence de température entre la peau et l'ambiance $\Delta T = \bar{T}_s - T_a$;
- vitesse d'un déplacement relatif des gaz de l'ambiance par rapport au sujet : v ;
- conductibilité thermique : k ;
- masse volumique : ρ
- chaleur spécifique à pression constante : C_p ;
- viscosité dynamique : μ
- facteur de forme : D .

La complexité tient à la superposition le plus souvent de deux types de convection : naturelle et forcée, si bien que des équations différentes sont proposées selon les cas. De plus, le facteur de forme rend difficile toute généralisation. Les études effectuées concernent le plus souvent des formes simples (plaque ou cylindre) à partir desquelles il est toujours hasardeux d'extrapoler à l'homme dont la morphologie échappe à toute définition simple (MISSENARD, 1957 ; VERON, 1965 ; WEIL, 1965).

Malgré les tentatives effectuées par certains auteurs (HARDY, 1949 ; Mac ADAMS, 1954 ; NEVINS et Coll., 1965 ; FOX et Coll., 1966). et les équations proposées à partir de considérations sur des modèles, de grandes incertitudes existent au sujet de la prédiction de ce type d'échange. Il faut néanmoins retenir une base de comparaison intéressante proposée par WEBB (1970) : la constante de convection ("convective constants" = $k_p C_p / M$) et le rapport de ce terme à sa valeur en air à 1 Ata, le caractère convectif ("convective character" : $(k_p C_p / M)_{\text{fluide}} / (k_p C_p / M)_{\text{air 1 Ata}}$). Ce procédé permet de comparer sur une même échelle des milieux de composition chimique différente, ce qui est souvent le cas en hyperbarie. Il est cependant très difficile de relier la constante de convection aux échanges par convection de l'homme en raison notamment du facteur de forme. Si bien que l'approche peut être la plus sûre, quoique sans grande prétention théorique, est l'approche empirique. Selon celle-ci :

$$C = hc (T_a - \bar{T}_s)$$

hc est le coefficient de transfert thermique par convection en Watt/m².°C. Ce coefficient rend compte des effets globaux de tous les facteurs signalés au début de ce paragraphe, mais du fait de la complexité des équations de convection, il n'y a pas de relation simple entre hc et la "convective constant" de WEBB, ainsi que le montre l'analyse dimensionnelle. Certains de ces facteurs ont été individualisés, en particulier par COLIN et HOUDAS (1967) qui dans les conditions normobares proposent une équation permettant de distinguer ce qui revient à la convection naturelle et à la convection forcée. Elle a été généralisée aux conditions hypobares et hyperbares en air sur des considérations purement théoriques (TIMBAL et Coll. 1969). En milieu Hélium-Oxygène un schéma de l'évolution de hc en fonction de PB a été présenté par RAYMOND et Coll. (1968) jusqu'à 14,6 Ata, mais il semble que les auteurs n'aient pas déduit de leurs calculs les pertes thermiques par convection respiratoire.

Sur un plan pratique la détermination de ce coefficient hc passe d'abord par celle de C . Or C ne peut être calculé qu'après détermination préalable de M , R , C_{res} , E , S , et mesure de T_a et T_s . L'équation permettant d'aboutir à la valeur de hc est la suivante :

$$hc = \frac{E + R + C_{res} \pm S - M}{T_a - \overline{T_s}} = \frac{C}{T_a - \overline{T_s}} \quad (6)$$

Dans cette équation, S doit être compté négativement s'il s'agit d'une dette et positivement s'il s'agit d'un stockage.

2.7. -- Conclusions

Les données actuelles sur les conditions de l'équilibre thermique du corps humain en milieu Hélium Oxygène, laisse persister le doute dans 3 domaines fondamentaux :

- 1°) - l'évolution du métabolisme ;
- 2°) - l'évolution des pertes thermiques par convection respiratoire ;
- 3°) - la valeur du coefficient d'échange thermique par convection " hc " en fonction de la pression. Il faut remarquer que la détermination de ce dernier tributaire de l'évaluation de tous les autres termes du bilan thermique représente un maximum de complexité exceptionnellement abordé en dehors d'un laboratoire spécialisé.

/...

III. - TECHNIQUES ET PROTOCOLE

=====

3.1. - Techniques de mesure

3.1.1. - Mesure des températures

3.1.1.1. - Température sèche, Température parois, Température rectale, Températures cutanées.

Les températures étaient mesurées par des thermocouples cuivre-constantan. Les soudures "froides" et les soudures "chaudes" étaient placées toutes deux à l'intérieur du caisson de plongée et les enregistreurs à l'extérieur. En procédant de la sorte la transmission des signaux et le passage à travers la coque du caisson se faisaient sur fil de cuivre sans adjonction de couples supplémentaires.

La soudure froide était constituée d'un vase en matière plastique à parois très épaisses contenant environ 3,5 litres de glace pilée. Les thermocouples passaient à travers le couvercle de ce récipient et plongeaient dans la glace. La température de la glace était vérifiée par une thermistance située à la même hauteur que les thermocouples. De plus, à la fin de chaque expérience, un thermomètre de précision, gradué à 0,02°C, spécialement étudié pour résister aux hautes pressions (RICHTER et WIESE) était plongé dans la glace pour en vérifier la température. Le maintien de zéro de référence à $\pm 0,10^\circ\text{C}$ a pu ainsi être vérifié dans tous les cas.

Les températures de l'environnement étaient mesurées par 6 thermocouples répartis de la façon suivante :

- Température sèche de l'ambiance entre le plancher et le dos du sujet : Ta 1.
- Température sèche de l'ambiance à 60 cm au-dessus du sujet : Ta₂ et Ta₃.
- Température du plancher : Tw1
- Température du plafond : Tw2 et Tw3

Comme il est apparu que la température du plancher Tw1 et celle de l'ambiance la plus proche du plancher Ta1 étaient plus basses que les autres de 2 à 3 degré, les mesures ont été pondérées de la façon suivante :

/...

$$\bar{T}_a = 0,5 T_{a_1} + 0,25 (T_{a_2} + T_{a_3}) \quad (7)$$

$$\bar{T}_w = 0,5 T_{w_1} + 0,25 (T_{w_2} + T_{w_3}) \quad (8)$$

La température moyenne de l'environnement (T_o) était calculée selon :

$$T_o = 0,5 (\bar{T}_a + \bar{T}_w) \quad (9)$$

Les températures corporelles du sujet étaient mesurées par 11 thermocouples, répartis selon une méthode classique (COLIN et HOUDAS, 1967) :

- un thermocouple noyé dans une olive de laiton, utilisé pour mesurer la température rectale T_{re} ,

- dix thermocouples soudés sur de petits disques de laiton appliquées sur la peau par des sangles. Les 10 valeurs mesurées étaient pondérées par des coefficients permettant le calcul de la température cutanée moyenne \bar{T}_s :

- pied :	0,07
- mollet :	0,13
- cuisse :	0,19
- ventre :	0,12
- dos :	0,12
- poitrine :	0,12
- bras :	0,08
- avant-bras :	0,06
- main :	0,05
- front :	0,06

Ces diverses températures (T_a , T_w , T_s , T_{re}) étaient enregistrées sur deux enregistreurs potentiométriques MECI à 12 voies chacun, l'inscription des 12 points se faisant en 48 secondes.

3.1.1.2. - Températures des gaz inspirés et expirés.

Afin de pouvoir mesurer la température des gaz inspirés et expirés par le sujet d'expérience aussi près que possible de la bouche nous avons réalisé un embout bucal dans lequel une cloison médiane permet la séparation des gaz expirés et des gaz inspirés, chaque canalisation étant munie d'une soupape inspiratoire ou expiratoire (Mc CUTCHAN et coll. 1951- L'HUILLIER et coll. 1970). Un thermocouple situé entre la bouche et la soupape inspiratoire mesure la température des gaz inspirés, un second

/...

placé à l'inverse entre la bouche et la soupape expiratoire mesure la température des gaz expirés (figure 1).

Ces thermocouples sont constitués par deux fils, l'un de cuivre, l'autre de constantan de 2/10 de mm de diamètre, soudés entre eux en un point et dénudés sur un centimètre de façon à réaliser une boucle.

L'autre extrémité des deux fils soudés ensemble sur quelques millimètres réalise la soudure froide constituée comme il est décrit ci-dessus (3.1.1.1.).

Les deux brins de cuivre du faisceau sont reliés à une des plumes d'un enregistreur SEFRAM (SERVORAC). La constante de temps de ces thermocouples est de l'ordre de 10 mSec. On enregistre ainsi graphiquement les déplacements de la plume correspondant à la différence de potentiel, fonction de la différence de température entre les gaz respiratoires et la soudure froide.

L'étalonnage de cette chaîne de mesure est réalisé en injectant à la place des thermocouples une différence de potentiel connue, dont on mesure la déflexion correspondante sur l'enregistreur.

Sachant par ailleurs qu'à une différence de potentiel donnée correspond une température donnée, une simple règle de trois permet de connaître la température correspondant à la déflexion fournie par les thermocouples en supposant une relation linéaire entre deux valeurs très proches de température.

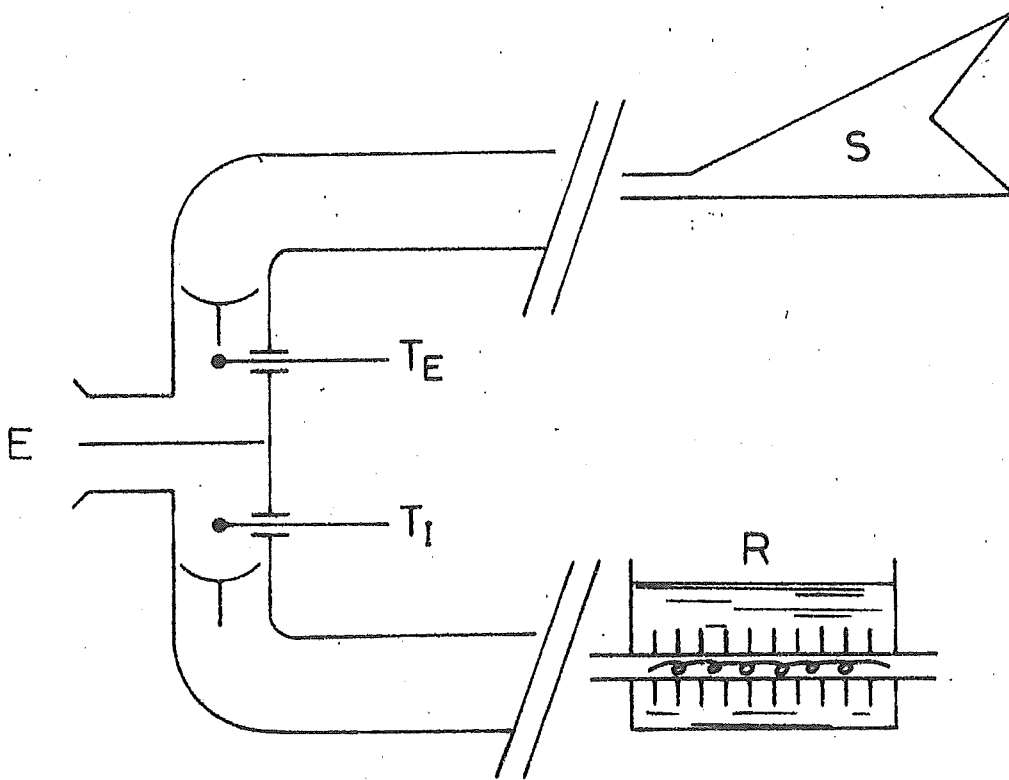
Pour le calcul nous n'avons utilisé que la température moyenne relevée dans le cas de l'expiration au niveau du plateau thermique expiratoire situé en fin d'expiration.

Dans le cas de l'inspiration, lorsque le sujet inhale des gaz à la température ambiante, il n'existe pas de variation importante de la température lors du demi-cycle inspiratoire et une température moyenne inspiratoire est aisément déterminée.

Par contre lorsque le sujet inhale des gaz préalablement refroidis on observe d'importantes variations de la température au cours du demi cycle inspiratoire et nous n'avons tenu compte que du point minimal de température situé en fin d'inspiration.

Afin de réaliser un refroidissement des gaz inhalés par le sujet en expérience nous avons réalisé un refroidisseur placé à quelques centimètres avant la soupape inspiratoire. Ce refroidisseur est constitué

- FIGURE 1 -



d'une cuve métallique de 12 X 34 X 24,5 cm, traversée à 6 cm de sa base par un tuyau métallique de 30 mm de diamètre et muni d'aillettes favorisant les échanges thermiques. Le diamètre intérieur du tuyau est occupé par une plaque métallique découpée en hélice favorisant l'écoulement turbulent du gaz et donc les échanges thermiques. Les faces extérieures de la cuve sont recouvertes d'une épaisse couche de polystyrène expansé.

Au cours de l'expérience la cuve est emplie d'un mélange de glace pilée et de sel. On a pu ainsi réaliser des températures de gaz inspirés inférieures à 10°C.

3.1.2. - Mesure des échanges gazeux

Le métabolisme du sujet en expérience a été apprécié par la mesure de sa consommation d'oxygène. Cette mesure a été réalisée par la technique dite en circuit ouvert et le calcul effectué selon l'équation :

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{STPD} \times F_{tO_2} \quad (10)$$

où l'on voit que la mesure de la consommation d'oxygène (\dot{V}_{O_2}) nécessite la connaissance de deux grandeurs.

- la ventilation STPD (\dot{V}_{STPD})
- l'oxygène vrai (F_{tO_2}).

Mesure de la ventilation STPD

La ventilation STPD est calculée à partir de la ventilation ATPS selon l'équation :

$$\dot{V}_{STPD} = \dot{V}_{ATPS} \frac{P_B - P_{H_2O}}{1013} \times \frac{273}{T} \quad (11)$$

où :

- P_B représente la pression barométrique ambiante, c'est-à-dire dans le caisson au moment de l'expérience et exprimée en millibars.
- P_{H_2O} est la pression de vapeur d'eau saturante à la température du caisson au moment de l'expérience, exprimée elle aussi en millibars.
- T la température ambiante au moment de la mesure exprimée en degrés Kelvin.

La ventilation ATPS est mesurée en recueillant dans un sac de caoutchouc de 100 l. la totalité des gaz expirés par le sujet pendant 10 minutes.

Le volume des gaz expirés est alors mesuré grâce à un volumètre "GALLUS" avec lequel on peut espérer une précision du décilitre.

Le volume ainsi mesuré est rapporté au temps pour obtenir un débit ventilatoire exprimé en $\text{dm}^3 \text{mn}^{-1}$.

Mesure des pressions

La pression barométrique régnant dans le caisson a été calculée à partir de la connaissance de la profondeur en mètres d'eau de mer donnée par un profondimètre.

La densité de l'eau de mer est égale à 1,026.

Ainsi, 1 Ata correspond à 1013 mb ou 10,33 mètres d'eau douce ou à 10,068 mètres d'eau de mer.

Mesure de l'hygrométrie

La mesure de l'humidité relative de l'atmosphère du caisson de plongée a été mesurée grâce à un hygromètre à cheveu MAXANT, type 1854. L'étalonnage de l'appareil est effectué en entourant le capteur d'un chiffon humide pendant 15 à 30 minutes au bout desquelles on affiche sur l'indicateur 100 % d'humidité relative.

Mesure de F_{tO_2}

$$F_{tO_2} = \frac{F_I O_2 (1 - F_E CO_2) - F_E O_2}{1 - F_I O_2} \quad (12)$$

nécessite pour la mesure la connaissance de trois grandeurs. La fraction d'oxygène dans le gaz inspiré ($F_I O_2$)

. La fraction

d'oxygène dans le gaz expiré ($F_E O_2$)

. La fraction

de gaz carbonique dans le gaz expiré ($F_E CO_2$)

(On admet là que la fraction de gaz carbonique dans le gaz inspiré est nulle ou négligeable ce que nous avons toujours vérifié).

Mesure de $P_{I O_2}$

La fraction inspirée d'oxygène a été mesurée à partir d'un échantillon de l'air du caisson prélevé dans un ballon de 2 litres à travers un passage cloison muni d'une double robinetterie, après avoir pris soin de rincer le ballon et le tuyau du passage cloison.

Cet échantillon de gaz est alors aussitôt passé sur un analyseur d'oxygène Westhingsouse modèle 209, qui comporte une cellule à combustible. Celle-ci donne une différence de potentiel régie par la loi de NERNST

$$E = \log \frac{P_{O_2R}}{P_{O_2X}} \quad (13)$$

P_{O_2R} est la pression partielle d'oxygène de référence (211,7 mb)

P_{O_2X} est la pression partielle d'oxygène du mélange à analyser.

Cette différence de potentiel donne sur un enregistreur SEFRAM une déflexion proportionnelle au logarithme du rapport des pressions partielles d'oxygène entre l'air atmosphérique et l'échantillon à mesurer.

L'appareil est préalablement étalonné avec une série de mélange d'hélium - oxygène et de CO_2 étalons. Les fractions d'oxygène et de gaz carbonique diminuant de façon hyperbolique (la $P_{I O_2}$ étant maintenue constante à 300 mb), en fonction de la pression, la composition du mélange étalon a été adaptée à chaque palier de pression afin de permettre une détermination correcte des pressions partielles mesurées.

Cet appareil a l'avantage de donner une différence de potentiel fonction du logarithme du rapport des pressions partielles, mais cette différence apparait indépendante de la pression barométrique à laquelle est réalisée l'expérience :

En effet, on a selon l'équation de NERNST.

$$E = K \log \frac{P_{O_2R}}{P_{O_2X}} \quad (a)$$

et puisque $P_{O_2} = P_B \times F_{O_2}$

$$E = K \log \frac{F_{O_2R}}{F_{O_2X}} \quad (b)$$

/...

Si l'on considère un quotient respiratoire égal à l'unité.

$$\dot{V}_{O_2} = A \dot{V}_E (F_{IO_2} - F_{EO_2}) \quad (c)$$

A est le facteur de conversion BTPS - STPD égal

$$\text{à } \frac{273}{273 + T} \times \frac{P_B}{760} = k P_B \quad (d)$$

Par conséquent A est une fonction de P_B , k étant constant.

Si par ailleurs on admet que la consommation d'oxygène (\dot{V}_{O_2}) et la ventilation (\dot{V}_E) sont deux constantes, on peut écrire :

$$F_{IO_2} - F_{EO_2} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_E k P_B} = \frac{a}{P_B} \quad (e)$$

où "a" est une constante.

Mais à F_{IO_2} et F_{EO_2} correspondent respectivement une force électromotrice :

$$E_I = K \log \frac{F_{O_2 R}}{F_{IO_2}} \quad (f)$$

et
$$E_E = K \log \frac{F_{O_2 R}}{F_{EO_2}} \quad (g)$$

d'où
$$E_I - E_E = K \left(\log \frac{F_{O_2 R}}{F_{IO_2}} - \log \frac{F_{O_2 R}}{F_{EO_2}} \right) \quad (h)$$

$$E_I - E_E = K \log \frac{F_{EO_2}}{F_{IO_2}} \quad (i)$$

En remplaçant F_{EO_2} par sa valeur tirée de l'équation (e) on obtient enfin.

$$E_I - E_E = K \log \left(\frac{F_{IO_2} - \frac{a}{P_B}}{F_{IO_2}} \right) \quad (j)$$

en multipliant par P_B il vient :

$$E_I - E_E = K \log \left(\frac{P_B F_{IO_2} - a}{P_B F_{IO_2}} \right) \quad (k)$$

Or "a" est une constante.

$P_B F_{IO_2}$, représente la pression partielle d'oxygène du mélange gazeux qui a été maintenue constante en fonction de la pression.

Par conséquent la différence de potentiel fournie par l'appareil est indépendante de la pression totale.

/...

Mesure de $F_E O_2$

Elle est effectuée à partir d'un échantillon de volume connu prélevé dans les sacs de recueil des gaz expirés ayant servi à la mesure de la ventilation.

Cet échantillon recueilli dans un ballon de caoutchouc de deux litres est passé à l'extérieur du caisson par le sas et immédiatement analysé par l'analyseur WESTINGHOUSE, comme précédemment. Il est à noter qu'à partir du palier de pression correspondant à 152 m d'eau de mer, la dilatation des gaz contenus dans le ballon à la sortie du sas entraînait fréquemment une rupture du caoutchouc, si bien qu'à ce niveau et à 300 m les prélèvements ont été recueillis à l'extérieur du caisson grâce au passage possible cloison muni d'un robinet après avoir pratiqué un rinçage aussi minutieux que/ grâce au grand volume de gaz disponible.

Mesure de $F_I CO_2$

La fraction de gaz carbonique des gaz inspirés a été mesurée à partir du même ballon que la fraction d'oxygène inspiré et simultanément. Pour ce faire on a utilisé un analyseur HARTMANN et BRAUN/^(type URAS 4)monté en parallèle avec l'analyseur d' O_2 et lui aussi couplé à une plume de l'enregistreur SEFRAM. Cet appareil utilisant ces propriétés, l'absorption du CO_2 dans l'infrarouge donne une différence de potentiel proportionnelle à la concentration de CO_2 .

L'atmosphère du caisson de plongée étant régénérée en circuit fermé, nous n'avons enregistré que des PI_{CO_2} toujours inférieures à 1 mb, donc négligeables (cf. tableau 3), si bien que nous avons pu considérer FI_{CO_2} comme nul dans le calcul de FEO_2 .

Mesure de $F_E CO_2$

La fraction expirée de gaz carbonique a été mesurée à partir du même échantillon de gaz expiré que FEO_2 et simultanément et dans les mêmes conditions que ci-dessus. Dans le but de réduire le risque d'erreur, les mesures des fractions inspirées d'oxygène et de gaz carboniques ont été effectuées sur deux prélèvements différents effectués l'un au début de chaque expérience, l'autre à la fin.

Les mesures des fractions expirées d'oxygène comme de CO_2 ont été faites sur trois prélèvements différents effectués à dix minutes d'intervalle les uns des autres (cf. protocole 3.2).

Enfin toutes ces analyses ont été doublées par des mesures chromatographiques effectuées au Laboratoire de Chimie de la COMEX (Mr. PROSPERI).

T A B L E A U I I I

SAGITTAIRE I
 CARACTÉRISTIQUES DE L'AMBIANCE
 (VALEURS MOYENNES)

Niveau m. H ₂ O mer	P _B mb	P _{H₂O} mb	P _{O₂} mb	P _{CO₂} mb	P _{He} mb	$\frac{\bar{T}_o + \bar{T}_w}{2}$ °C	ρ kg.m ⁻³	C _p Jg ⁻¹ .°K ⁻¹	μ 10 ⁻⁶ Pl	k mW/m ⁻¹ .°K ⁻¹
5 m Air	1531	26	310	<1	1190	25	1,95	1,01	17,23	24,22
5 m He	1511	33	284	<1	1190	27	0,62	2,42	18,97	124,07
13 m He	2307	35	288	<1	1980	28	0,76	2,92	18,95	131,84
34 m He	4437	37	293	<1,5	4110	29	1,14	3,63	18,93	139,04
74 m He	8464	37	290	<1	8130	30	1,85	4,25	18,91	142,93
152 m He	16304	36	306	<1	15960	31	3,25	4,62	18,91	144,83
300 m He	31192	40	321	<1	30830	32	5,89	4,86	18,90	145,88

3.1.3. - Mesure des variations de poids

Les pertes thermiques par évaporation au niveau de la peau et des voies respiratoires ont été mesurées à partir de la variation de poids du sujet en expérience.

Pour mesurer cette variation de poids nous avons placé pendant toute la durée de l'expérience le sujet nu, allongé au centre d'un lit constitué d'un treillis métallique à larges mailles tendu sur un cadre placé à l'intérieur d'un bâti métallique tronc pyramidal. Le lit lui-même est suspendu par quatre filins d'acier au plateau d'une balance qui occupe le sommet du tronc de pyramide.

La balance permet d'apprécier les variations de poids au décagramme près.

On effectue une pesée au début de l'expérience, puis une seconde à la 45e minute, une troisième à la 120e minute (cf. protocole 3-2). Les calculs ont été effectués à partir des résultats obtenus entre la 45e et la 120e minute, soit sur 75 minutes et ramenés à une heure après déduction de la variation de poids métabolique, elle-même estimée à partir des échanges gazeux. En l'absence de sudation la variation de poids représente donc la perspiration insensible cutanée, la perte de vapeur d'eau par les voies respiratoires et la perte de poids métabolique.

3.2. - Protocole

Profil général de plongée

Au cours de l'expérience SAGITTAIRE I, le bilan énergétique de quatre sujets a été étudié en fonction de la pression barométrique lors d'une plongée fictive à 300 m effectuée dans les caissons de la COMEX à MARSEILLE en novembre 1971. Les mesures ont été réalisées au cours de la phase de compression en sept paliers de deux jours chacun et correspondant respectivement à :

1,51	ATA	en	Air	
1,49	ATA	en	mélange	Hélium-Oxygène
2,28	-	-	-	-
4,38	-	-	-	-
8,36	-	-	-	-
16,09	-	-	-	-
30,79	-	-	-	-

Pour chacun de ces sept paliers les caractéristiques de l'ambiance sont données dans le tableau n° III.

/...

Pendant toute l'expérience la température ambiante dans le caisson a été ajustée de façon à obtenir le confort thermique des plongeurs. Le tableau 3 montre que cette exigence conduit à accroître progressivement la température \bar{T}_0 en fonction de la pression. La pression partielle en oxygène a été maintenue constante à 300 ± 20 mb et la pression partielle en CO_2 inférieure à 1 mb.

Caractéristiques biométriques des sujets

Les mesures ont été faites sur quatre sujets jeunes et en bonne santé dont trois BB - BA et PL sont des plongeurs professionnels, le quatrième FS étant le médecin accompagnateur.

Les caractéristiques biométriques des sujets sont données dans le tableau IV.

TABLEAU IV - Caractéristiques biométriques des sujets				
SUJETS	AGE ans	POIDS kgs	TAILLE m	SURFACE CORPORELLE m ²
B.B.	23	60,5	1,74	1,73
B.A.	37,5	76,5	1,73	1,90
P.L.	30	73,5	1,80	1,93
F.S.	31	72	1,78	1,90

A chaque palier chaque sujet effectuait une expérience :

- BB et PL le matin à partir de 9 h.
- BA et FS l'après-midi à partir de 15 h.

Protocole expérimental d'une expérience

Lorsque le sujet est équipé de ses thermocouples et qu'il est installé au repos en decubitus dorsal sur le lit, le signal de départ de l'expérience est donné, on est alors au temps 0 et on effectue la première pesée.

/...

temps 45 - On effectue la seconde pesée après quoi le sujet prend l'embout buccal et expire dans un sac. On commence à enregistrer les températures des gaz inspirés et expirés.

" 60 - on recueille les gaz dans un sac S₁.

" 70 - " " " S₂.

" 80 - " " " S₃.

" 90 - Le sujet en expérience quitte l'embout buccal mais reste allongé sur le lit.

Le volume des sacs est mesuré après avoir effectué dans chacun d'eux un prélèvement grâce à une seringue calibrée. Les trois prélèvements sont alors passés à l'extérieur aux fins d'analyse.

C'est pendant cette période, que les valeurs des différentes températures, autres que respiratoires et enregistrées depuis le début de l'expérience - temps 0 - sont prises en considération pour les calculs.

temps 120 - On procède à la troisième pesée. Puis le sujet reprend l'embout buccal après que l'on ait installé le refroidisseur sur le circuit inspiratoire et on enregistre les températures inspiratoires et expiratoires.

temps 130 - Le sujet respire les gaz refroidis.

" 140 - On recueille les gaz expirés dans un sac S₄.

" 155 - On effectue la dernière pesée.

Le sujet quitte l'embout et reste au repos stricte.

Comme lors de la séquence précédente on mesure le volume du sac et l'on passe à l'extérieur l'échantillon de gaz qui sera analysé.

Ce protocole était suivi :

1°) - au niveau du hublot de surveillance grâce au tableau V. Ce poste avait la charge de synchroniser ces différentes opérations entre le caisson et la salle de mesure.

2°) - à l'intérieur du caisson, grâce au tableau n° VI qui avait été fourni aux plongeurs.

/...

TABLEAU V - Protocole SAGITTAIRE.

(Poste Hublot)

N° :

NOM :

Date :

Profondeur :

P.B. :

Séquence :

Temps d'expé- rience	Temps réel	Ordre à donner	Résultat à noter
0		- Début = "Top" général	
		- 1ère Pesée	<u>P₁</u>
0.45		- 2ème Pesée	<u>P₂</u>
		- Prendre l'embout buccal	<u>Humidité :</u>
		- Placer le Pince-Nez	<u>Température :</u>
60		- Début 1er Prélèvement gazeux	
70		- Début 2ème Prélèvement gazeux	
80		- Début 3e Prélèvement gazeux	
		- Fin du 3ème Prélèvement	<u>Sac n° 1 :</u> <u>V₁</u>
		- Récupérer échangeur thermiq.	<u>V₂</u>
		- Lacher embout et pince-nez	<u>Sac n° 2 :</u> <u>V₁</u>
		- Vérifier thermocouples	<u>V₂</u>
		- Sujet immobile	<u>Sac n° 3 :</u> <u>V₁</u>
		- Echantillons à l'extérieur	<u>V₂</u>
		- Mesure du volume des sacs	
120		- 3ème pesée	<u>P₃</u>
130		- Début gaz froids	
140		- Début prélèvement froid	<u>Humidité :</u>
150		- Fin prélèvement froid	<u>Température :</u>
155		- 4ème pesée	<u>Sac n° 4 :</u> <u>V₁</u>
			<u>V₂</u>
			<u>P₄</u>

TABLEAU VI

Instructions aux plongeurs

1 - PREPARATION

		O P E R A T I O N	
N°s	Temps		
1			<u>Vérification des branchements :</u>
1a	-30 mn		- Au niveau des boîtes de jonction (petites boîtes noires), les branchements <u>ne doivent jamais être touchés</u> . Vérifier que tout est en place.
1b			- Au niveau des prises sortie de la Sphère : brancher ou vérifier que les branchements sont corrects. Les câbles en provenance des boîtes de jonction ont des prises correspondantes :
			A branché sur A
			B " " B
			C1 " " C1
			C2 " " C2
1c			Débrancher les prises de la rangée électro. etc...
1d			Vérification du niveau d'eau du modèle.
2	-25		<u>Préparation de la soudure froide</u>
3	-15		<u>Préparation du sujet :</u>
3a			- Le faisceau est placé sur le cou du sujet, et l'extrémité pend du côté gauche.
			- Attacher les sangles du côté gauche, en serrant moyennement et dans l'ordre suivant :
3b			. pied = couple sur le dos du pied
3c			. mollet = face externe au 1/3 supérieur
3d			. cuisse = face externe partie moyenne
3e			. ventre = en-dessous de l'ombilic (a souvent tendance à se retourner)
3f			. dos = milieu du dos
3g			. poitrine = sous le sein gauche
3h			. main = dos de la main
3i			. avant-bras = face externe partie moyenne
3j			. bras = face externe partie moyenne
3k			. front = milieu du front
3l			. rectale = nettoyer - vaseliner - introduire à 10 cm minimum
			<u>Nota :</u> en fixant les sangles élastiques, il faut prendre les fils provenant des capteurs situés plus bas.

/...

TABLEAU VI (suite)

		O P E R A T I O N	
N°s	Temps		
4	-5	<u>Installation du sujet sur le lit :</u> Bien au milieu - le capteur n° 12 doit pendre sous le lit. Le câble est accroché au-dessus du sujet.	
5	-1	Vérifier que tous les couples sont bien en place, et n'ont pas été déplacés ou retournés en cours d'installation. Au besoin, modifier le serrage des sangles.	
6	-0	Suspendre le lit à l'aide de la manivelle.	
<u>II - ETUDE DU BILAN THERMIQUE</u>			
7	0	1ère pesée (P1) : sujet immobile bien centré sur le lit, vérifier que le lit ne touche à rien et est bien suspendu, noter le poids exact (P1). Le transmettre à l'extérieur.	
8	5	Fin vraisemblable de la 1ère pesée. Période "Relax". Le sujet reste allongé sur le lit. Pendant cette période, de l'extérieur on cherchera à assurer le confort thermique du sujet. Celui-ci devra signaler ses impressions.	
9	45	2ème pesée (P2) : même protocole que pour P1.	
0	50	Prendre l'embout buccal.	
1		Mettre en place le pince nez.	
2	60	<u>Début de prélèvement des gaz respiratoires.</u> Le sujet continue à respirer normalement, et ne s'occupe de rien.	
3	70	Fin du 1er prélèvement (S1) Début du 2ème prélèvement (S2)	
4	80	Fin du 2ème prélèvement (S2) Début du 3ème prélèvement (S3)	
5	90	Fin du 3ème prélèvement (S3)	
6		Vérification des thermocouples. Pendant la 1/2 heure qui suit, le sujet reste immobile, bras étendus le long du corps, jambes allongées (non repliées, non croisées).	

/...

TABLEAU VI (suite)

O P E R A T I O N

N°s	Temps	
		Les accompagnateurs assurent pendant cette période les mesures des volumes des sacs et le passage des échantillons à l'extérieur.
17a		Prélèvement de la seringue sur S1.
17b		Mesurer le volume S1 (restant) au volucompteur : noter chiffres avant et après le passage du sac.
18a		idem mais pour S2
18b		idem mais pour S2
19a		idem mais pour S3
19b		idem mais pour S3
20	120	3ème pesée (P3) : même protocole que pour P1.
III - REFROIDISSEMENT DES GAZ INSPIRES		
21a	125	Reprise de l'embout buccal
21b		Vérifier les thermocouples
22		Mise en place de l'échangeur froid - mélange glace + sel
23	140	Début du prélèvement gazeux comme en 12 = S1
24	150	Fin du prélèvement gazeux comme en 13 = S1
		Les accompagnateurs procèdent avec le sac comme de 17 à 18
27	155	4ème pesée (comme pour P1).

IV. - RESULTATS

4.1. - La Température Rectale (Tableau VII)

Les températures rectales sont en général assez basses. Ceci s'explique sans doute par la constitution d'une certaine dette thermique au cours des 90 premières minutes des expériences. Pendant cette période, en effet, les sujets étaient au repos complet, conformément au protocole établi, afin de se trouver en régime stable entre la 90e et la 120e minute où tous les calculs devaient être effectués. Bien souvent, au cours de ce repos préliminaire, il a été nécessaire de réchauffer la température des gaz circulant dans la sphère, les sujets ayant légèrement froid. En raison de l'inertie thermique de la sphère, ce réchauffage ne pouvait se faire que lentement et il était pratiquement impossible d'éviter que les sujets ne se refroidissent.

On observe en moyenne une discrète augmentation de la Tre à partir de 8,4 ATA, et celle-ci devient nette à 31 ATA.

Il faut enfin remarquer, que la valeur absolue de la température rectale n'est pas entrée dans les calculs qui ont été effectués, si bien que ces chiffres un peu bas n'ont aucune conséquence pour la détermination du bilan thermique.

Au cours de la respiration des gaz froids qui a entraîné une déperdition calorique importante par les voies respiratoires, la baisse de la Tre est relativement modérée jusqu'à 8,4 ATA où le plus souvent elle reste inférieure à 0,10°C. A 16 ATA elle est de l'ordre de 0,10 à 0,15°C et à 31 ATA elle atteint 0,20°C.

TABLEAU VII

Température rectale (Tre) entre t 90 et t 120

(\bar{m} : moyenne ; S_M : écart type de la moyenne)

milieu	P _B (ATA)	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S_M
AIR	1,51	36.30	36.50	36.70	36.35	36.46	0.09
He O ₂	1,49	36.40	37.00	36.50	36.80	36.68	0.14
"	2,28	36.50	36.25	36.50	37.10	36.59	0.18
"	4,38	36.50	36.90	36.50	36.10	36.50	0.16
"	8,36	36.55	36.95	36.30	36.75	36.64	0.14
"	16,09	36.90	36.50	36.70	36.95	36.76	0.10
"	30,79	37.50	37.30	36.95		37.25	0.16

4.2. - La Température Cutanée Moyenne (Tableau VIII et IX)

Le but poursuivi était de maintenir la \bar{T}_s au voisinage de 34°C , cette valeur étant habituellement considérée comme correspondant à la sensation de confort.

Les valeurs présentées sur le tableau VIII correspondent à la moyenne sur 30 minutes (entre t 90 et t 120) des températures cutanées moyennes.

En considérant l'ensemble des résultats, palier par palier, on voit que la température cutanée moyenne augmente progressivement au fur et à mesure de l'accroissement de la pression. Il s'agit là d'un phénomène passif lié à l'augmentation de la température de l'environnement afin d'assurer un certain confort aux sujets d'expérience.

Les résultats du tableau VIII montrent que le plus souvent les chiffres sont au dessous de 34°C . Certains, sont même nettement inférieurs à 33°C . Dans ce cas, ils correspondent aux expériences au cours desquelles les sujets se sont plaint du froid. Il s'agit essentiellement du confinement en air à 1,5 ATA et du cas du sujet B.B. à 2,3 ATA. La comparaison de ces données avec celles du tableau IX montre que la température sèche et la température des parois étaient également les plus basses dans ces expériences. Il n'y a pas eu d'enregistrement électromyographique pour vérifier l'existence d'un frisson éventuel ou d'un accroissement du tonus musculaire. A défaut de ce test, les sujets interrogés ont signalé assez constamment une horripilation, parfois un certain degré d'hypertonie musculaire apprécié subjectivement et donc sous toute réserve, et plus rarement quelques petits frissons intermittants.

Entre 33 et 34°C , les avis des intéressés n'ont obéi à aucune règle. Parfois ils se trouvaient très bien, mais assez souvent ils éprouvaient une sensation de léger froid avec horripilation, sans qu'il y ait des frissons.

A 31 ATA, le sujet P.L. avec une \bar{T}_s de 34.09 a éprouvé une sensation de confort frais, et le sujet B.B. avec une \bar{T}_s supérieure à 35°C une sensation de confort chaud.

En conclusion, la température cutanée moyenne est restée le plus souvent inférieure à 34°C , en relation essentiellement avec les caractéristiques thermiques de l'ambiance. Malgré son augmentation progressive au fur et à mesure de l'accroissement de la pression, elle a été le plus habituellement associée à une sensation de confort frais.

TABLEAU VIII

Température cutanée moyenne entre t 90 et t 120
 (\bar{m} = moyenne ; S_M = écart type de la moyenne)

milieu	P_B	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S_M
AIR	1.51	31.25	32.24	32.97	33.30	32.44	0.45
He-O ₂	1.49	33.19	33.65	33.34	33.85	33.51	0.15
"	2.28	31.32	33.35	34.64	33.70	33.25	0.70
"	4.38	33.39	33.97	33.08	33.40	33.46	0.18
"	8.36	33.99	33.28	33.83	33.91	33.75	0.16
"	16.09	34.22	33.58	34.35	33.29	33.86	0.25
"	30.79	35.53	34.56	34.09	32.86	34.26	0.55

TABLEAU IX

Température sèche (Ta), Température des parois (Tw),
 Température moyenne de l'ambiance (To) en °C
 (\bar{m} = moyenne ; S_M = écart type de la moyenne)

milieu	P_B	T	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S_M
AIR	1.51	Ta	25.39	28.08	26.31	26.03	26.45	0.57
		Tw	22.82	25.59	24.71	25.97	24.77	0.70
		To	24.10	26.83	25.51	26.00	25.61	0.57
He-O ₂	1.49	Ta	27.97	28.37	29.46	28.86	28.66	0.32
		Tw	25.74	25.90	26.75	27.23	26.41	0.35
		To	26.85	27.13	28.10	28.04	27.53	0.40
He-O ₂	2.28	Ta	25.75	30.57	32.45	29.71	29.62	1.41
		Tw	23.94	27.84	29.18	27	26.99	1.11
		To	24.84	29.21	30.82	28.36	28.31	1.26
He-O ₂	4.38	Ta	29.58	29.60	29.99	30.34	29.95	0.25
		Tw	28.09	28.67	28.30	27.74	28.20	0.19
		To	28.83	29.13	29.15	29.04	29.04	0.07

TABLEAU IX

(suite)

milieu	P _B	T	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{T}	S _M
He-O ₂	8.36	Ta	30.45	29.51	31.46	31.40	30.71	0.46
		Tw	27.60	27.74	29.06	28.79	28.30	0.37
		To	29.03	28.62	30.26	30.10	29.50	0.40
He-O ₂	16.09	Ta	31.75	32.04	31.93	31.30	31.76	0.16
		Tw	30.63	30.75	30.08	28.89	30.09	0.43
		To	31.19	31.39	31.01	30.09	30.92	0.29
He-O ₂	30.79	Ta	33.60	32.74	31.97	31.45	32.44	0.47
		Tw	32.43	31.41	31.15	29.71	31.18	0.56
		To	33.02	32.08	31.56	30.57	31.81	0.51

4.3. - Le Stockage ou la Dette Thermique (S).

(Tableaux X et XI)

Il a été calculé à partir de la variation de la température rectale (ΔT_{re}) et cutanée moyenne ($\Delta \bar{T}_s$), entre la 90e et la 120e minute.

Le tableau X montre les valeurs individuelles de ces variations thermiques. Dans la majorité des cas on observe une diminution des températures corporelles. Dans 6 cas c'est au contraire une augmentation qui est notée (1,5 ATA, He O₂ = sujet P.L. ; 2,3 ATA = sujets B.A. et P.L. ; 16 ATA = sujets B.A. et P.L. et 31 ATA = sujet B.B.). Mais ces augmentations ne concernent que la température cutanée moyenne. La température rectale ne s'est par contre jamais relevée ; dans les meilleures conditions elle est restée sans changement (4 expériences).

A partir de ces données le bilan thermique a été déterminé à l'aide de l'équation 5 en tenant compte du poids et de la surface des sujets. Dans la plupart des cas il s'agit comme on pouvait s'y attendre d'après l'évolution des températures, d'une dette (cf. tableau XI). Elle est en moyenne de l'ordre d'une dizaine de Watt/m² sans qu'il y ait d'évolution systématique avec la pression. Parfois elle est nettement plus importante (sujet F.S. à 16 et 31 ATA, sujet P.L. à 4,4, 8,4 et 31 ATA, sujet B.A. à 1,5 ATA Air et 4,4 ATA, sujet B.B. à 16 ATA). Dans ce cas les valeurs ne correspondent pas forcément aux températures ambiantes les plus basses.

/...

En fait il n'est pas possible de trouver une relation simple en raison de la variation importante du coefficient d'échange thermique avec la Pression et dans une moindre mesure des variations métaboliques. C'est ainsi que le sujet P.L. à 31 ATA avec une \bar{T}_s de 34.09 et une T_o de 30.57 accuse une dette de près de 15 Watts/m². Ce résultat est de toute évidence lié à l'importance des pertes thermiques par convection à ce niveau de pression.

Inversement, dans 4 expériences, un stockage de chaleur modéré a été observé. Il est très logiquement lié à des températures d'environnement relativement élevées. En effet, aux niveaux où des stockages existent : 1,5 ATA en He-O₂, 2,3 ATA et 31 ATA, ils correspondent aux températures sèches les plus élevées (cf. tableau IX). Cette observation est intéressante car le phénomène n'est pas du à un excès de chaleur métabolique bien que l'on puisse éventuellement discuter de ce point de vue le cas du sujet B.B. à 31 ATA.

En conclusion, d'une façon générale les sujets ont subi une dette thermique non négligeable, qui s'accorde d'ailleurs assez bien avec la sensation de "confort frais" éprouvée par eux.

TABLEAU X

Variation de la température rectale (ΔT_{re}) et cutanée moyenne (ΔT_s), entre t 90 et t 120. (ΔT en °C)

milieu	P.B.	T	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S_M
AIR	1.51	T _{re}	- 0.15	- 0.15	0	0	-0.075	0.043
		T _s	- 0.22	- 0.30	- 0.41	- 0.02	-0.238	0.082
He-O ₂	1.49	T _{re}	- 0.15	- 0.15	- 0.05	- 0.10	-0.113	0.024
		T _s	- 0.10	- 0.15	+ 0.16	- 0.24	-0.083	0.086
"	2.28	T _{re}	- 0.30	- 0.05	0	- 0.05	-0.10	0.068
		T _s	- 0.02	+ 0.26	+ 0.30	- 0.06	+0.12	0.093
"	4.38	T _{re}	0	- 0.10	- 0.10	- 0.15	-0.088	0.031
		T _s	- 0.10	- 0.39	- 0.41	- 0.25	-0.288	0.072
"	8.36	T _{re}	- 0.05	- 0.15	- 0.20	- 0.05	-0.113	0.037
		T _s	- 0.10	- 0.07	- 0.20	- 0.05	-0.105	0.033
"	16.09	T _{re}	- 0.05	- 0.10	- 0.15	- 0.30	-0.150	0.054
		T _s	- 0.45	+ 0.02	+ 0.09	- 0.27	-0.152	0.126
"	30.79	T _{re}	- 0.05	- 0.10	- 0.15	- 0.25	-0.138	0.043
		T _s	+ 0.21	- 0.07	- 0.31	- 0.37	-0.135	0.132

/...

TABLEAU XI

Stockage ou Dette Thermique : S
(S : Watt/m²)

milieu	P.B.	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S _M
AIR	1.51	- 11.82	- 15.54	- 10.04	- 0.48	- 9.47	3.21
He-O ₂	1.49	- 9.10	- 11.64	+ 1.47	-13.16	- 8.10	3.30
"	2.28	- 16.36	+ 4.27	+ 7.36	- 7.06	- 2.33	5.74
"	4.38	- 2.28	- 15.28	- 14.94	-11.37	-10.97	3.02
"	8.36	- 4.54	- 9.58	- 14.94	- 3.64	- 8.18	2.60
"	16.09	- 14.78	- 4.66	- 5.14	-21.21	-11.45	4.00
"	30.79	+ 2.50	- 7.00	- 14.95	-21.20	-10.16	5.12

4.4. - Les échanges gazeux

4.4.1. - Variables métaboliques - \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_{CO_2} , R =
(Tableau XII - Tableau XIII- fig. 2 et 3)

Chez aucun de nos quatre sujets la consommation d'oxygène n'augmente significativement avec la pression ou la masse volumique (Tableau XII et Tableau XIII). Elle diminue significativement pour F.S. L'inhalation de gaz refroidis pendant 20 minutes, ne provoque pas d'accroissement sensible de la prise d'oxygène bien que cette inhalation accroisse de façon importante la déperdition thermique et provoque une dette de chaleur appréciable (cf. supra 4.1 et infra 4.7). Le quotient respiratoire augmente par contre significativement avec la pression (Tableau XIII). Cette augmentation de R est à mettre en relation avec une augmentation (significative pour B.B. et B.A.) de \dot{V}_{CO_2} en fonction de la pression. Pour l'ensemble des sujets cet accroissement de \dot{V}_{CO_2} en fonction de P_B est significatif au seuil p = 0,06.

/...

TABLEAU XII

Données métaboliques relevées à chaque niveau de pression pour chaque sujet. Les chiffres des quatre colonnes de gauche représentent la moyenne des trois déterminations effectuées durant l'inhalation de gaz à température ambiante (cf protocole) les chiffres des quatre colonnes de droite représentent la seule détermination effectuée lors de l'inhalation de gaz refroidis.

Sujets	P _B Ata	\dot{V}_{O_2}	\dot{V}_{CO_2}	R	$M = \frac{\dot{W}_{O_2}}{A}$	\dot{V}_{O_2}	\dot{V}_{CO_2}	R	$M = \frac{\dot{W}_{O_2}}{A}$
		dm ³ mn ⁻¹	dm ³ mn ⁻¹		W m ⁻²	dm ³ mn ⁻¹	dm ³ mn ⁻¹		W m ⁻²
B.B.	Air	1.51	0.211	0.155	0.74	39.9			
	He	1.49	0.316	0.245	0.78	60.4	0.264	0.215	0.81
	"	2.28	0.257	0.214	0.83	49.8	0.256	0.238	0.93
	"	4.38	0.226	0.186	0.83	43.7	0.251	0.228	0.91
	"	8.36							
	"	16.09	0.245	0.236	0.97	49.1			
	30.79	0.277	0.264	0.95	55.3	0.293	0.287	0.99	59.1
B.A.	Air	1.51	0.223	0.169	0.75	38.8			
	He	1.49	0.249	0.189	0.77	43.4	0.317	0.228	0.72
	"	2.28	0.262	0.210	0.80	46.2	0.288	0.203	0.70
	"	4.38	0.243	0.211	0.86	43.5	0.247	0.195	0.79
	"	8.36	0.233	0.211	0.89	42.8	0.221	0.204	0.92
	"	16.09	0.297	0.252	0.86	53.1			
	30.79	0.267	0.245	0.94	48.4	0.239	0.228	0.96	43.6
P.L.	Air	1.51	0.307	0.251	0.82	53.2			
	He	1.49	0.299	0.245	0.84	52.6	0.319	0.318	0.99
	"	2.28	0.273	0.253	0.93	48.9	0.355	0.318	0.95
	"	4.38	0.369	0.316	0.86	64.9	0.594	0.477	0.80
	"	8.36	0.342	0.319	0.94	61.4	0.275	0.267	0.97
	"	16.09	0.365	0.322	0.88	63.5	0.289	0.279	0.96
	30.79	0.312	0.282	0.91	55.6	0.437	0.363	0.83	76.3
F.S.	Air	1.51	0.301	0.228	0.75	52.3	0.294	0.193	0.66
	He	1.49	0.285	0.197	0.69	49	0.250	0.189	0.76
	"	2.28	0.292	0.214	0.73	50.5	0.257	0.200	0.78
	"	4.38	0.232	0.175	0.76	40.4	0.255	0.203	0.80
	"	8.36	0.211	0.196	0.93	38.4			
	"	16.09	0.275	0.260	0.94	50.2	0.263	0.238	0.90
	30.79	0.231	0.212	0.92	41.9	0.263	0.204	0.78	46.1

/...

FIGURE 2

Consommation d'oxygène et quotients respiratoires.

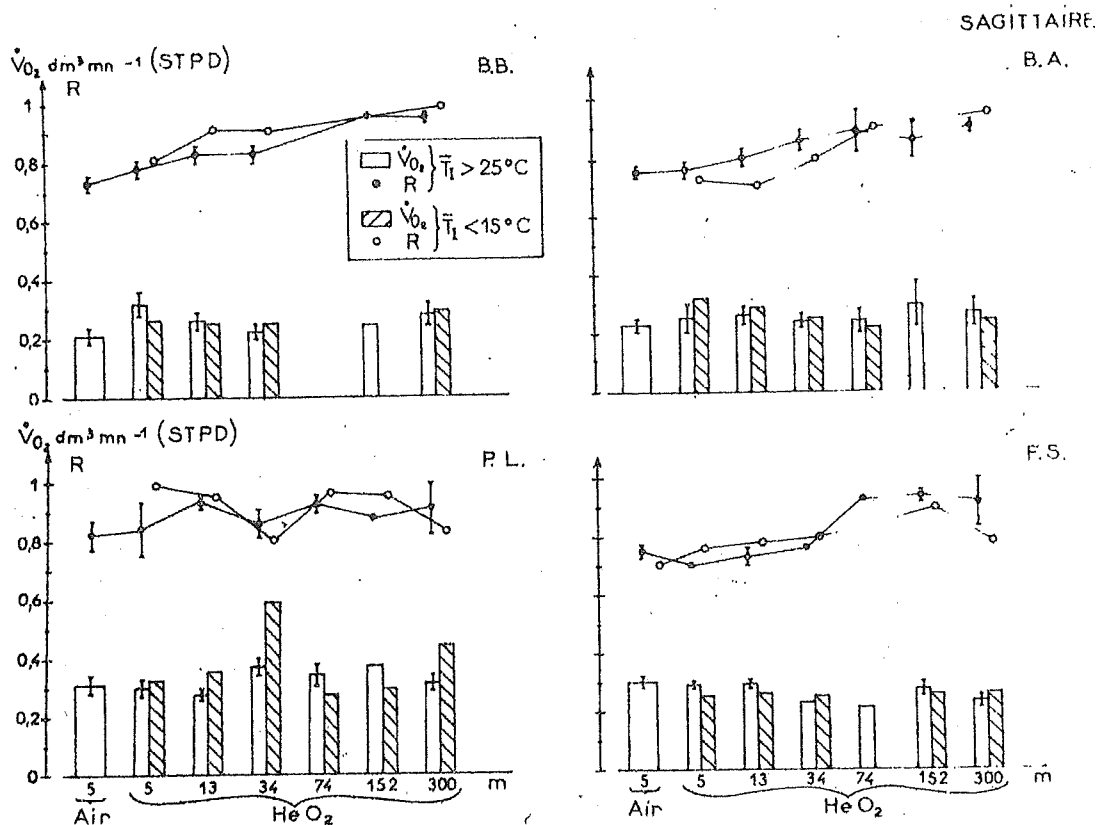
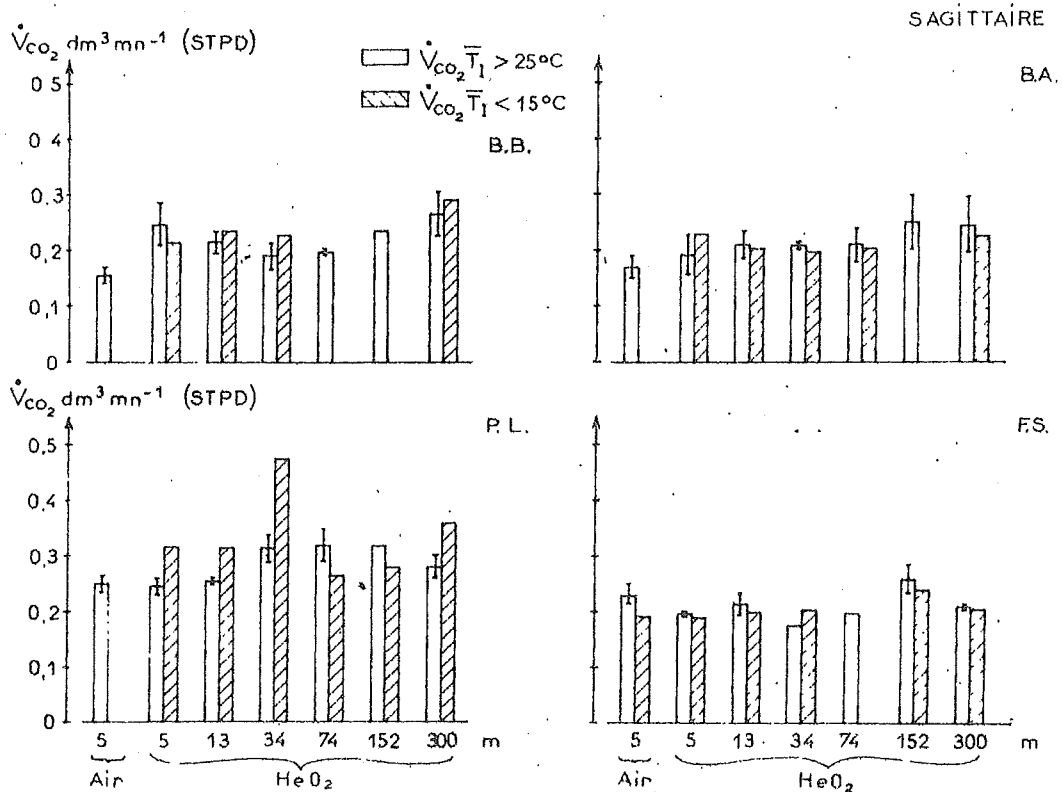


FIGURE 3

Rejet de CO₂



Régressions linéaires calculées pour différentes variables physiologiques en fonction de la pression ambiante exprimée en bars. (r = coefficient de corrélation ; n = nombre de valeurs ; p = probabilité pour que le coefficient de régression trouvé ne soit pas différent de zéro).

TABLEAU XIII

Variable	Sujets	Régressions linéaires en fonction de P _B (bars)	r	n	p	
R	B.B.					
	B.A.	R = 0,806 + 0,00486 P _B	0,53	80	< 0,001	
	P.L.					
	F.S.					
V _E BTPS dm ³ mn ⁻¹	B.B.	V _E = 6,25 + 0,00144 P _B	0,18	19	> 0,1	ns
	B.A.	= 5,60 + 0,039 P _B	0,47	21	< 0,05	
	P.L.	= 10,42 - 0,0075 P _B	0,05	21	> 0,1	ns
	F.S.	= 7,54 - 0,00139 P _B	0,21	19	> 0,1	ns
V _{O₂} cm ³ mn ⁻¹	B.B.	V _{O₂} = 0,240 + 0,00066 P _B	0,14	20	> 0,1	ns
	B.A.	= 0,243 + 0,0012 P _B	0,26	21	> 0,1	ns
	P.L.	= 0,317 + 0,00053 P _B	0,13	20	> 0,1	ns
	F.S.	= 0,281 - 0,00163 P _B	0,47	19	< 0,05	
V _{CO₂} cm ³ mn ⁻¹	B.B.	V _{CO₂} = 0,193 + 0,00218 P _B	0,53	20	< 0,05	
	B.A.	= 0,192 + 0,00212 P _B	0,55	21	< 0,01	
	P.L.	= 0,273 + 0,00102 P _B	0,29	20	> 0,1	ns
	F.S.	= 0,209 + 0,00060 P _B	0,22	19	> 0,1	ns
V _A dm ³ mn ⁻¹	B.B.	V _A = 5,06 + 0,0347 P _B	0,51	6	> 0,1	ns
	B.A.	= 9,46 + 0,555 P _B	0,08	6	> 0,1	ns
	P.L.	= 8,98 - 0,0074 P _B	0,10	5	> 0,1	ns
	F.S.	= 5,38 + 0,0146 P _B	0,18	6	> 0,1	ns
P _A CO ₂ Torr	B.B.	P _A CO ₂ = 36,22 + 0,179 P _B	0,56	6	> 0,1	ns
	B.A.	= 39,62 + 0,153 P _B	0,63	6	0,1	
	P.L.	= 26,29 + 0,113 P _B	0,61	5	> 0,1	ns
	F.S.	= 30,17 + 0,172 P _B	0,63	6	0,1	
f mn ⁻¹	B.B.	f = 9,69 - 0,0661 P _B	0,34	6	> 0,1	ns
	B.A.	= 9,12 + 0,0339 P _B	0,74	6	0,05	
	P.L.	= 7,39 + 0,0363 P _B	0,42	6	> 0,1	ns
	F.S.	= 9,76 + 0,0760 P _B	0,46	6	> 0,1	

TABLEAU XIII

(suite)

Variable	Sujets	Régressions linéaires en fonction de P_B (bars)	r	n	p	
V_T BTPS dm^3	B.B.	$V_T = 0,67 + 0,0109 P_B$	0,67	6	< 0,1	
	B.A.	$0,68 - 0,00280 P_B$	0,37	6	> 0,1	ns
	P.L.	$1,45 - 0,00296 P_B$	0,11	6	> 0,1	ns
	F.S.	$0,728 - 0,00338 P_B$	0,27	6	> 0,1	ns
\dot{W}_{O_2} Watt	B.B.	$\dot{W}_{O_2} = 83,92 + 0,201 P_B$	0,16	6	> 0,1	ns
	B.A.	$83,67 + 0,396 P_B$	0,59	6	> 0,1	ns
	P.L.	$109,97 + 0,187 P_B$	0,16	6	> 0,1	ns
	F.S.	$87,99 - 0,230 P_B$	0,25	6	> 0,1	ns

4.4.2. - Les variables ventilatoires \dot{V}_E , \dot{V}_A , P_{ACO_2}
(Tableau XIV et figures 4 et 5)

Les chiffres de ventilation (\dot{V}_E) à partir desquels ont été calculés les \dot{V}_{O_2} et \dot{V}_{CO_2} sont rapportés dans le tableau XIV, et la figure 4. On y voit que la ventilation BTPS ne varie pas systématiquement avec la pression (Il en est de même du volume courant V_T et de la fréquence f avec cependant dans ces deux cas une dispersion beaucoup plus grande d'une expérience à l'autre). Durant l'inhalation de gaz refroidis \dot{V}_E ne se modifie pas de façon significative par rapport à sa valeur lors de l'inhalation de gaz à température ambiante. Ceci est conforme à ce qu'avaient décrits FLORENTIN et coll. (1964). Par contre, la diminution de fréquence et l'augmentation du volume courant décrits par ces auteurs n'ont pas été retrouvés.

La ventilation alvéolaire \dot{V}_A (Tableau XIV) des sujets a été calculée en supposant le volume mort V_D indépendant de la pression (SALTZMAN et coll. 1971) mais fonction du volume courant V_T selon une relation linéaire établie par BARGETON et coll. (1967) $V_D = 0,0307 V_T + 133 \text{ cm}^3$ (14). De là, connaissant \dot{V}_E et f on a :

$$\dot{V}_A (\text{cm}^3 \text{mn}^{-1}) = \dot{V}_E (\text{cm}^3 \text{mn}^{-1}) (1 - 0,0307) - 133 f \quad (15)$$

Les chiffres de \dot{V}_A obtenus par le calcul ci-dessus durant une seule des trois séquences de mesure (la mesure de la fréquence respiratoire est issue des enregistrements de température des gaz inspirés

/...

et expirés. Pour des raisons en rapport avec l'organisation du protocole expérimental, cet enregistrement n'était effectué que pendant la séquence de recueil des gaz expirés) sont rapportés dans le tableau XIV. Ils ne montrent pas de variations systématiques avec la pression.

A partir de ces valeurs de \dot{V}_A et de celles de \dot{V}_{CO_2} ont été calculées les valeurs de P_{ACO_2} grâce à la relation classique issue des équations de l'air alvéolaires (FENN et coll. 1946).

$$P_{ACO_2} = k \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_A} \quad (16)$$

Les valeurs de P_{ACO_2} (là encore calculées sur une seule séquence de dix minutes d'inhalation de mélange à température ambiante, comme pour \dot{V}_A) sont rapportées dans le tableau XIV. Ces valeurs apparaissent faibles pour FS et surtout PL. Ceci est à mettre en rapport soit avec l'application de la formule de détermination de V_D (BARGETON et coll. 1967) qui selon les auteurs donne une valeur moyenne à $\pm 25 \text{ cm}^3$ près, soit avec l'hyperventilation relative de ces deux sujets (cf. fig. 4) surtout P.L. Quoiqu'il en soit des valeurs absolues, les chiffres montrent un accroissement relatif discret, mais réel de P_{ACO_2} (significatif pour B.A.) avec la pression ambiante qui apparait nettement sur la figure 5. Lorsque sont comparés les résultats groupés des trois niveaux inférieurs (5, 13 et 34 mètres) et de trois niveaux supérieurs (74, 152 et 300 m) la différence devient significative au seuil de 0,1.

L'ensemble des régressions linéaires des différentes variables d'échange gazeux en fonction de P_B est donnée dans le tableau XIII.

/...

TABLEAU XIV

Données ventilatoires relevées à chaque niveau de pression et pour chaque sujet. Les chiffres de la colonne 1 représentent la moyenne des trois déterminations effectuées durant l'inhalation de gaz à température ambiante (cf. protocole), les chiffres de la colonne 4 représentent la seule détermination effectuée lors de l'inhalation de gaz refroidis. Les chiffres des colonnes 2 et 3 ont été obtenus par calcul (cf. texte) à partir d'une seule des trois déterminations entrant dans la moyenne correspondante de la colonne 1 (gaz à température ambiante).

Sujets		P_B	\dot{V}_E BTPS $\text{dm}^3\text{mn}^{-1}$	\dot{V}_A $\text{dm}^3\text{mn}^{-1}$	PA_{CO_2} torr	\dot{V}_E BTPS dm^3s^{-1}
B.B.	Air	1,51	5,340	4,235	33,4	
	He	1,49	7,399	6,147	35,8	6,420
	"	2,28	6,109	4,439	39,7	10,194
	"	4,38	6,353	5,440	34,3	6,479
	"	8,36	6,362	4,982	35,1	6,345
	"	16,09	6,464	5,088	43,4	8,125
B.A.	Air	30,79	6,749	6,481	40,4	7,720
	Air	1,51	5,280	4,411	37,4	
	He	1,49	5,423	3,560	40,3	6,610
	"	2,28	5,679	4,974	41,8	5,589
	"	4,38	6,100	5,193	36,8	5,913
	"	8,36	6,345	5,305	40,5	5,605
P.L.	Air	16,09	6,266	5,356	44,5	4,926
	He	30,79	6,669	3,960	43,5	6,937
	Air	1,51	8,669	7,534	31,1	
	He	1,49	9,693	8,597	24,1	14,290
	"	2,28	10,188	7,806	27,3	13,430
	"	4,38	10,840	10,240	29,3	22,440
F.S.	Air	8,36	12,358	9,337	26,4	10,618
	He	16,09	11,379			14,250
	"	30,79	9,115	8,551	29,7	11,360
	Air	1,51	8,019	6,125	31,2	6,632
	He	1,49	7,543	6,365	27,8	7,220
	"	2,28	7,565	5,513	31,8	7,398
F.S.	"	4,38	6,501	4,153	30,8	7,164
	"	8,36	6,934	4,999	31	6,008
	"	16,09	7,779	6,570	36,9	7,125
	"	30,79	7,004	5,592	33,6	6,820
	"					

/...

FIGURE 4

Ventilations en dm^3 par minute.

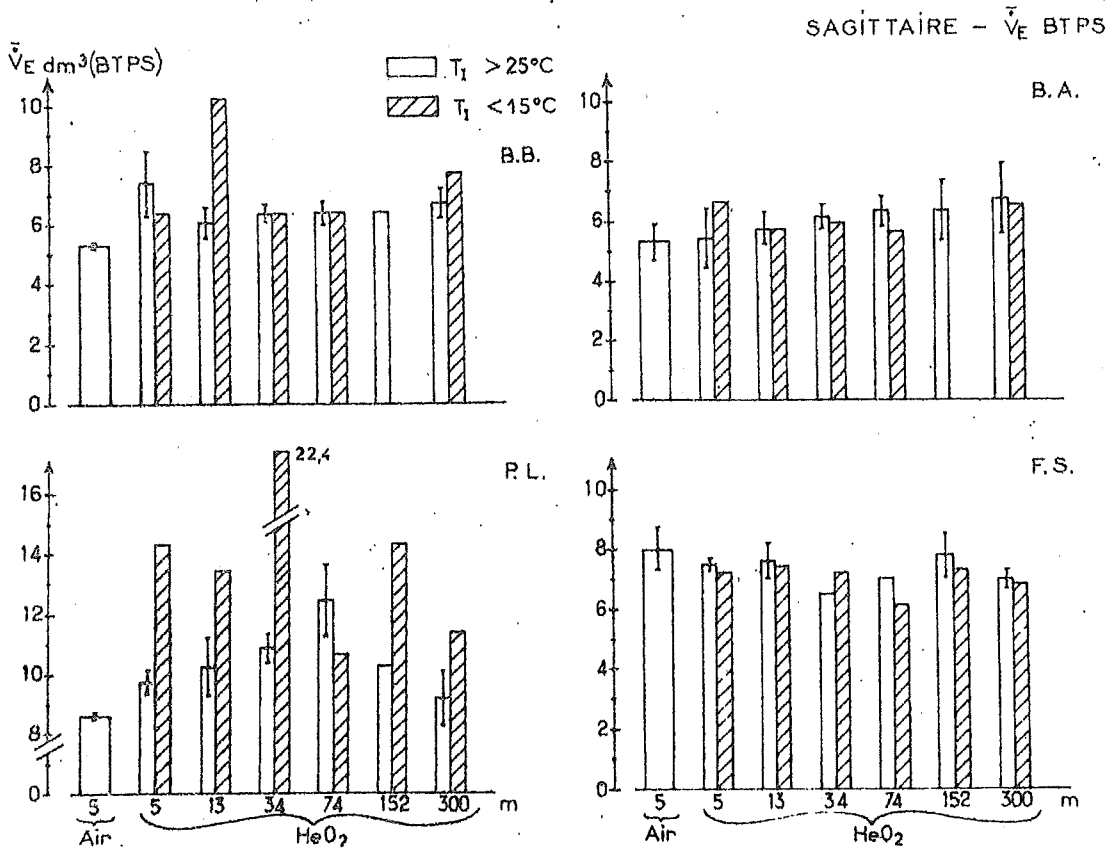


FIGURE 5

Pressions partielles de CO_2 alvéolaires.

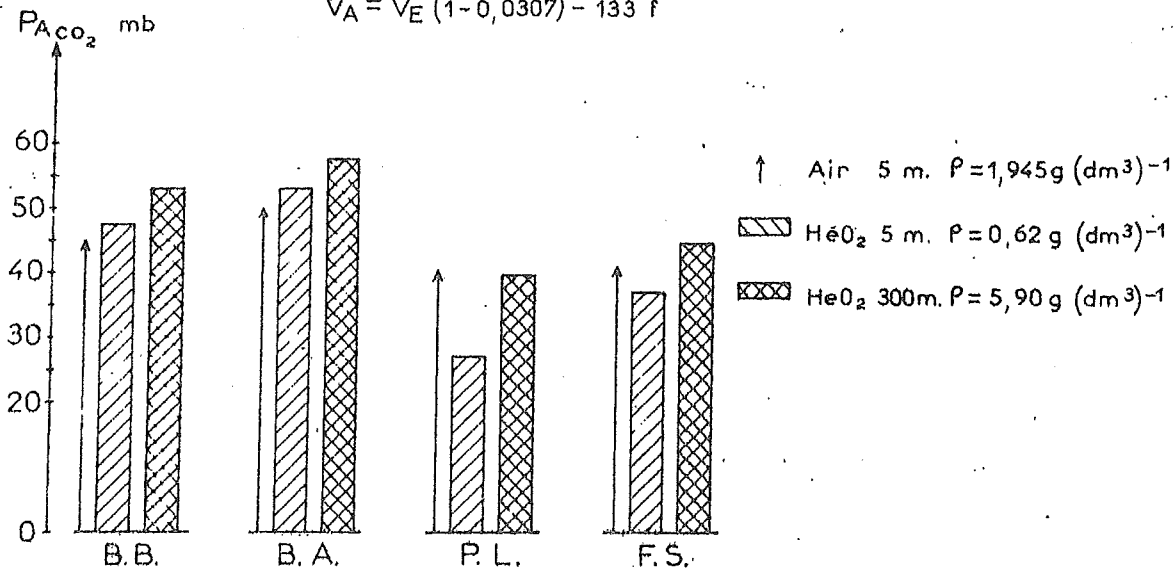
$$P_{A\text{CO}_2} = \frac{1013 \times 310}{273} \frac{\dot{V}_{\text{CO}_2}}{\dot{V}_A} \quad \text{W.O. FENN et coll. 1946}$$

- \dot{V}_{CO_2} mesuré

- \dot{V}_A calculé d'après D. BARGETON et coll. 1967

$$\dot{V}_A = \dot{V}_E (1 - 0,0307) - 133 \text{ f}$$

SAGITTAIRE



4.5. - Les pertes thermiques par radiation

(Tableaux XIII - XV et XVI)

Les pertes thermiques par radiation ont diminué au fur et à mesure de l'augmentation de la Pression. En fait, ce phénomène n'est pas dû aux effets de la pression sur les lois d'échange thermique par radiation. Il est la conséquence de la diminution de la différence de température entre la peau et les parois. La température de la peau n'a pas subi de changements notables avec la pression, hormis, une légère augmentation, mais la température des parois du caisson s'est accrue dans des proportions importantes passant de 24.77°C au début en moyenne à 31.18°C à la fin à 31 ATA. Il en résulte donc une diminution du gradient thermique entre les deux et par conséquent des pertes par radiation. RAYMOND et coll. (1968) avaient d'ailleurs abouti aux mêmes constatations.

Le coefficient de transfert thermique par radiation hr, calculé par la méthode simplifiée de GAGGE et HARDY (1967) est présenté dans le tableau XVI pour mémoire, car ce n'est pas, par son intermédiaire que dans le cas présent, les pertes de chaleur par radiation ont été déterminées. Il s'agit pratiquement d'une constante dont les faibles variations ne font que traduire et en quelque sorte valider l'approximation de GAGGE et coll : l'augmentation moyenne de 0,22 Watt/m² °C, correspond à la diminution de l'écart de température entre \bar{T}_s et T_w , mais ne met absolument pas en cause les lois d'échange.

Tableau XV

Pertes thermiques par radiation : R (R = Watts/m² ;
 \bar{m} moyenne ; S_M = écart type de la moyenne)

	P_B	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S_M
AIR	1,51	44,16	35,49	53,17	39,41	40,78	2,08
He-O ₂	1,49	39,98	41,72	35,57	35,91	38,29	1,52
"	2,28	38,89	29,90	30,01	36,27	33,77	2,26
"	4,38	28,80	28,97	25,96	30,71	28,61	0,98
"	8,36	34,75	30,04	26,10	27,99	29,72	1,86
"	16,09	19,83	15,60	23,54	23,99	20,74	1,95
"	30,79	17,39	17,50	16,27	17,21	17,09	0,28

/...

TABLEAU XVI

Coefficient d'échange thermique par radiation (hr)
(hr = Watt/m² °C ; \bar{m} = moyenne ; S_M écart type de la moyenne).

milieu	P _B	B.B.	B.Λ.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S _M
AIR	1,51	5,24	5,34	5,34	5,37	5,32	0,03
He-O ₂	1,49	5,37	5,38	5,39	5,42	5,39	0,010
"	2,28	5,27	5,43	5,50	5,42	5,41	0,05
"	4,38	5,43	5,46	5,43	5,43	5,44	0,01
"	8,36	5,44	5,42	5,48	5,46	5,45	0,01
"	16,09	5,52	5,51	5,51	5,45	5,50	0,02
"	30,79	5,60	5,55	5,53	5,46	5,54	0,03

4.6. - Les Pertes thermiques par évaporation
(Tableau XVII)

Elles restent du même ordre de grandeur quelle que soit la pression. Ce résultat est conforme à ce qui pouvait être prévu aussi bien pour les pertes évaporatoires par les voies respiratoires que par la peau. Deux cas particuliers peuvent s'expliquer : c'est tout d'abord celui du sujet B.B. au cours de la première expérience à 1,5 ATA en air où les pertes évaporatoires ont été si faibles qu'elles ont échappé à la mesure. De fait la température environnante était très basse et c'est l'expérience où le sujet a eu la plus grande sensation de froid. Il a sûrement persisté une perspiration à minima, mais trop faible pour être appréciée. Inversement le sujet P.L. à 8,4 ATA a présenté une perspiration très forte. Elle correspond très logiquement à un métabolisme élevé, et malgré ce fait elle a entraîné une dette thermique très importante.

Bien que les pertes thermiques dues à la perspiration ne soient pas très élevées, les sujets avaient la surface cutanée moïte. Ce fait ne peut être attribué à une perspiration accrue ou à la sudation. Il est très certainement dû à un pouvoir évaporatoire de l'ambiance relativement faible en raison d'une hygrométrie élevée et de l'absence de vent. L'évaporation restait cependant possible, mais au prix d'un accroissement du taux d'humidification de la peau, (HOUDAS et coll. 1972), d'où cette sensation de moiteur.

/...

Ce bas pouvoir évaporatoire de l'ambiance n'a pas eu de conséquence sur la thermorégulation dans ce cas particulier où les sujets étaient au repos complet.

TABLEAU XVII

Pertes thermiques par évaporation : E
(E = Watts/m² ; m = moyenne ;
S_M = écart type de la moyenne).

milieu	P _B	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	m	S _M
AIR	1,51	0	*	10,01	5,39	5,13	2,13
He - O ₂	1,49	8,54	6,65	5,60	5,65	6,61	0,68
"	2,28	6,55	6,31	4,71	7,03	6,15	0,50
"	4,38	8,24	9,30	4,97	5,01	6,88	1,11
"	8,36	5,41	5,48	20,06	5,32	9,07	3,66
"	16,09	9,69	9,00	4,69	3,19	6,64	1,59
"	30,79	5,32	8,50	2,89	5,23	5,49	1,15

* - A défaut de mesure valable, la valeur moyenne de E du sujet B.A. (7,54 W/m²), a été utilisée dans les calculs pour déterminer h_r.

4.7. - Les pertes thermiques par convection respiratoire :

(Tableaux XVIII, XIX, XX et fig. 6).

La formule donnée dans le tableau II montre que le calcul de la puissance dissipée ($\dot{W}_{CV} = C_{Res} \times A_D$) nécessite la mesure de \dot{V}_{BTPS} et celle de T_E et T_I qui en toute rigueur sont les températures moyennes en fonction du volume. En l'absence de possibilité de calcul (en voie de réalisation actuellement) nous avons considéré comme représentatif de ces températures moyennes la valeur minimale inspiratoire et maximale expiratoire (cf. supra 3-1-1-2). Cette façon de procéder est justifiée pour T_E par la présence d'un plateau de température expiré en fonction du temps, il en est de même pour T_I lorsque les gaz inhalés sont à température ambiante. Lors de l'inhalation de gaz refroidis, du fait des grandes variations de T_I au cours du demi cycle inspiratoire et de l'absence d'un plateau net cette estimation est plus criticable.

Les résultats observés pour T_I et T_E mesurés dans ces conditions sont donnés dans le tableau XVIII lors de l'inhalation de gaz à température ambiante et dans le tableau XIX pour l'inhalation de gaz refroidis.

/...

- FIGURE 6 -

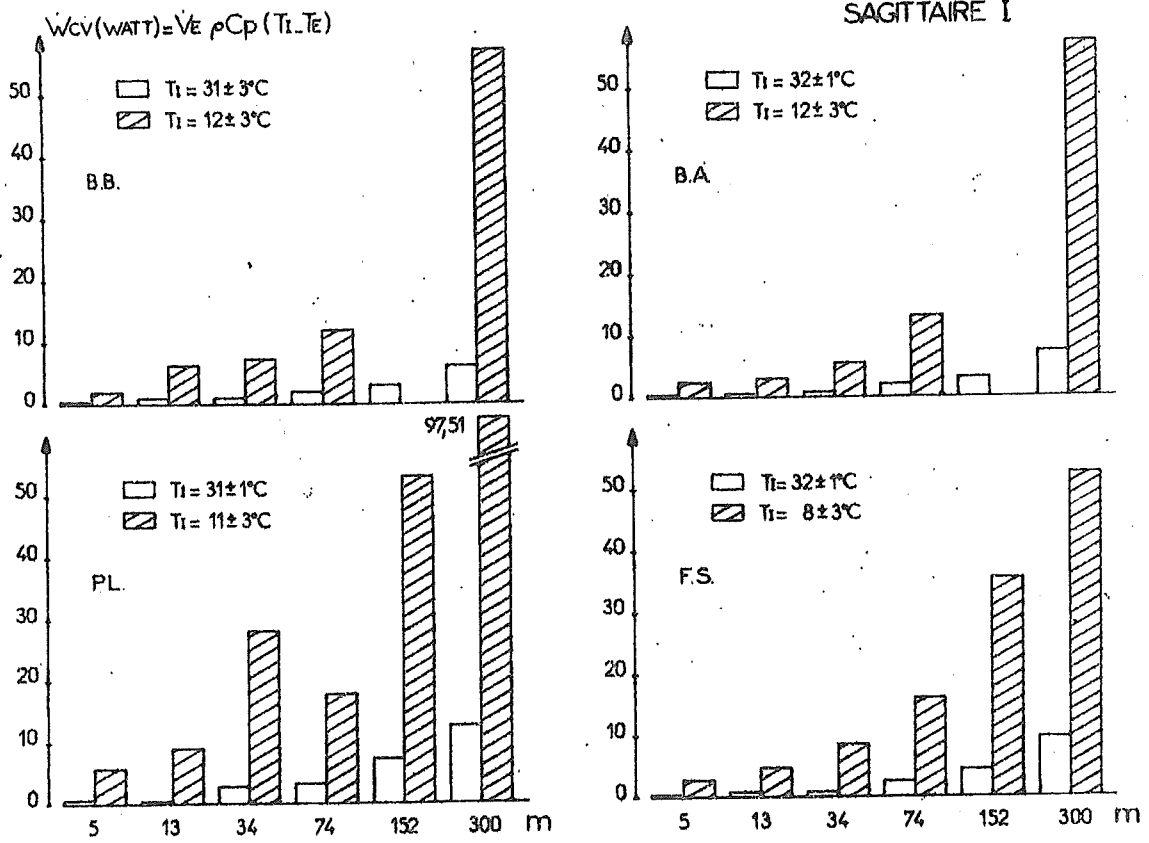


TABLEAU XVIII

Données d'échanges thermiques respiratoires lors de l'inhalation de gaz à température ambiante (convection uniquement) (\dot{V}_E STPD = Ventilation STPD ; \dot{n} = ventilation molaire ; T_I , T_E = Température des gaz inspirés et expirés ; \dot{W}_{ev} = Puissance dissipée par convection ventilatoire ; C_{res} = Puissance dissipée par convection ventilatoire rapportée à la surface cutanée ; $\frac{C_{res}}{M}$ x 100 pourcentage du métabolisme dissipé par convection respiratoire).

Sujets		P_B Ata	V_E STPD $dm^3 mn^{-1}$	\dot{n} $10^{-3} moles^{-1}$	T_I °C	T_E °C	\dot{W}_{cv} W	C_{res} (\dot{W}_{cv}/A) $W m^{-2}$	$\frac{C_{res}}{M}$ x 100
B.B.	Air	1,51	6,824	5	24,9	32,4	1,094	0,629	1,57
	He	1,49	9,293	6,9	29,7	33,0	0,511	0,293	0,48
	"	2,28	11,712	8,7	26,5	31,5	0,953	0,548	1,10
	"	4,38	24,140	17,9	31	33,6	0,957	0,550	1,26
	"	8,36	46,473	34,5	31,6	34,1	1,820	1,046	2,74
	"	16,09	89,80	66,8	33,2	35,2	2,806	1,612	3,27
	"	30,79	182,70	13,6	33,9	36	5,965	3,427	6,20
B.A.	Air	1,51	6,748	5	28,5	33,6	0,730	0,384	0,99
	He	1,49	6,780	5	30,3	33	0,308	0,162	0,37
	"	2,28	10,968	8,1	30,8	33,8	0,532	0,280	0,61
	"	4,38	23,187	17,2	32,3	34,3	0,736	0,387	0,89
	"	8,36	46,353	34,4	31,7	34,7	2,177	1,146	2,68
	"	16,09	88,494	65,8	33	35,3	3,178	1,673	3,15
	"	30,79	180,487	134	33,4	36	7,292	3,838	7,93
P.L.	Air	1,51	10,933	8,1	27,2	33,6	1,513	0,784	1,12
	He	1,49	12,227	9	30,1	33,3	0,645	0,334	0,64
	"	2,28	19,751	14,6	32,3	33,8	0,480	0,248	0,51
	"	4,38	40,712	30,2	30,1	34,5	2,843	1,473	2,27
	"	8,36	90,248	67,10	32,6	34,9	3,256	1,687	2,75
	"	16,09	144,110	107	32	35,2	7,204	3,733	6,07
	"	30,79	246,617	183	30,6	33,5	12,649	6,554	11,8
F.S.	Air	1,51	10,116	7,5	28,8	34,4	1,007	0,530	1,93
	He	1,49	9,436	7	30,6	33,4	0,431	0,227	0,46
	"	2,28	14,594	10,8	32	35	0,709	0,373	0,74
	"	4,38	24,782	18,4	33,2	34,8	0,670	0,332	0,87
	"	8,36	50,622	37,6	31,7	34,8	2,459	1,294	3,37
	"	16,09	109,804	81,6	32,6	35,2	4,455	2,345	4,67
	"	30,79	189,520	138	31	34,4	9,860	5,190	12,4

TABLEAU XIX

Données d'échanges thermiques respiratoires (convection uniquement) obtenues lors de l'inhalation de gaz préalablement refroidis (même légende que pour le tableau XVIII). Les valeurs de chaleur spécifique molaire utilisées étaient :

P_B	: 1,51	: 1,49	: 2,28	: 4,38	: 8,36	: 16,09	: 30,79
Ata	: Air	: He	: He	: He	: He	: He	: He
M_{cp}	:	:	:	:	:	:	:
J. mole "°C"	: 29,19	: 22,43	: 21,91	: 21,39	: 21,10	: 21,00	: 20,90

Sujets	P_B Ata	V_E STPD $dm^3 mn^{-1}$	\dot{n} $10^{-3} mole s^{-1}$	T_I °C	T_E °C	\dot{W}_{cv} W	C_{res} (W_{cv}/A)	$\frac{C_{res}}{M}$ $\times 100$
B.B.	Air: 1,51	:	:	:	:	:	:	:
	He: 1,49	: 8,065	: 6	: 15,4	: 29,8	: 1,935	: 1,112	: 2,19
	" : 2,28	: 19,544	: 14,5	: 8,5	: 28,6	: 6,344	: 3,646	: 7,17
	" : 4,38	: 24,620	: 18,3	: 10,2	: 29,2	: 7,435	: 4,273	: 8,61
	" : 8,36	: 46,350	: 34,4	: 12,5	: 29	: 11,976	: 6,883	: 17,1
	" : 16,09	: 114,76	: 85,4	: 9,7	: 28,5	:	:	:
" : 30,79	: 209,27	: 156	: 13,6	: 31,10	: 56,947	: 32,728	: 55,4	
B.A.	Air: 1,51	:	:	:	:	:	:	:
	He: 1,49	: 8,270	: 6,1	: 12,25	: 30,10	: 2,438	: 1,283	: 2,35
	" : 2,28	: 10,796	: 8,0	: 14,3	: 31,3	: 2,978	: 1,568	: 3,16
	" : 4,38	: 22,474	: 16,7	: 15,5	: 30,7	: 5,431	: 2,858	: 6,59
	" : 8,36	: 40,948	: 30,1	: 7,5	: 29,3	: 13,341	: 7,022	: 17,5
	" : 16,09	:	:	:	:	:	:	:
" : 30,79	: 176,92	: 132	: 9,4	: 30,2	: 57,208	: 30,110	: 69,04	
P.L.	Air: 1,51	:	:	: 10,7	: 31	:	:	:
	He: 1,49	: 18,029	: 13,4	: 10,3	: 29,5	: 5,762	: 2,985	: 5,15
	" : 2,28	: 27,647	: 20,5	: 12,3	: 32	: 8,843	: 4,582	: 7,17
	" : 4,38	: 84,280	: 62,7	: 8,1	: 29	: 28,042	: 14,529	: 14,1
	" : 8,36	: 77,538	: 57,6	: 17	: 31,5	: 17,622	: 9,130	: 18,4
	" : 16,09	: 148,21	: 110	: 9	: 32	: 53,227	: 27,579	: 52,9
" : 30,79	: 307,44	: 229	: 8,6	: 29	: 97,508	: 50,522	: 66,2	
F.S.	Air: 1,51	: 8,452	: 6,2	: 10	: 30,2	: 3,654	: 1,923	: 3,80
	He: 1,49	: 9,034	: 6,7	: 12,2	: 30,5	: 2,745	: 1,445	: 3,32
	" : 2,28	: 14,272	: 10,6	: 11,5	: 32	: 4,785	: 2,504	: 5,60
	" : 4,38	: 27,263	: 20,2	: 8,9	: 28,6	: 8,514	: 4,481	: 9,98
	" : 8,36	: 43,862	: 32,6	: 4,2	: 27,8	: 16,232	: 8,543	:
	" : 16,09	: 100,520	: 74,7	: 5,2	: 27,8	: 35,455	: 18,659	: 39,3
" : 30,79	: 185,674	: 138	: 7,5	: 26,5	: 55,102	: 29,001	: 63	

TABLEAU XX

Pourcentage du métabolisme dissipé par convection respiratoire pour différentes températures de gaz inspiré, en fonction de la pression (ensemble des sujets).

GAZ A TEMPERATURE AMBIANTE

P_B ATA	\bar{m}	T_I sm	\bar{m}	$\frac{CRES}{M}$	sm
1,49	30,2	±	0,4	±	0,11
2,28	30,4	±	2,7	±	0,26
4,38	31,7	±	1,4	±	0,66
8,36	31,9	±	0,5	±	0,32
16,09	32,7	±	0,5	±	1,37
30,79	32,2	±	1,7	±	3,00

GAZ PREALABLEMENT REFROIDIS

P_B ATA	\bar{m}	T_I sm	\bar{m}	$\frac{CRES}{M}$	sm
1,49	12,5	±	2,1	±	1,36
2,28	11,7	±	2,4	±	1,89
4,38	10,7	±	3,3	±	3,17
8,36	10,3	±	5,6	±	0,67
16,09	8	±	2,4	±	9,62
30,79	9,8	±	2,7	±	5,88

Ces tableaux ainsi que la figure 6 donnent aussi les résultats des calculs des pertes thermiques par convection respiratoire effectués grâce à l'équation du tableau II. Les chiffres montrent l'accroissement important des pertes thermiques par convection respiratoire en fonction d'une part de la pression et d'autre part de la température des gaz inspirés. Dans le but de donner une idée globale du phénomène nous avons reporté dans le tableau XX les valeurs obtenues en faisant la moyenne sur l'ensemble de nos sujets, du pourcentage du métabolisme total dissipé par voie respiratoire en fonction de la pression. Il est vraisemblable que cette estimation effectuée au repos est valable aussi à l'exercice musculaire modéré, zone dans laquelle la consommation d'oxygène augmente à peu près proportionnellement à la ventilation.

4.8. - Les pertes thermiques par convection cutanée (Cs)
(Tableaux XXI et XXII)

Contrairement aux autres types d'échanges thermiques, les pertes de chaleur par convection cutanée n'ont pas été déterminées directement ni indirectement à partir de mesures et de l'application des lois physiques. Comme indiqué précédemment dans le cas présent la seule façon de procéder a été d'établir la valeur de tous les autres éléments du bilan thermique (cf. chapitre 2-6-2) et d'en déduire par simple soustraction la convection cutanée.

Les résultats présentés dans le tableau XXI mettent en évidence une certaine dispersion. En fait celle-ci n'est pas imputable aux seules erreurs de mesure ainsi qu'on pouvait le supposer, mais aussi à la différence de température entre la peau et les gaz de la sphère (tableau XXII) qui est très variable d'une expérience à l'autre.

D'une façon générale, malgré ces réserves, les pertes par convection au niveau de la peau s'accroissent avec la pression de façon indiscutable. Elles sont pratiquement multipliées par 4 entre les deux extrêmes et ce malgré une tendance nette à la réduction du gradient thermique peau-ambiance, avec l'accroissement de la Pression.

/...

TABLEAU XXI

Pertes thermiques par Convection = C

(C = Watt/m² ; \bar{m} = moyenne ; S_M = écart type de la moyenne).

milieu	P _B	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S _M
AIR	1,51	7,02	10,83	8,36	7,45	8,41	0,84
He-O ₂	1,49	20,66	6,55	9,58	20,38	14,29	3,65
	2,28	20,15	5,41	6,61	13,86	11,51	3,43
	4,38	8,41	20,11		15,74	14,75	3,41
	8,36	13,05	15,71	28,54	16,42	18,43	3,45
	16,09	32,80	31,53	37,73	41,88	35,98	2,38
	30,79	26,65	25,55	44,04	35,48	32,93	4,31

TABLEAU XXII

Différence de température entre la peau et l'ambiance en °C

(\bar{m} = moyenne ; S_M = écart type de la moyenne)

milieu	P _B	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S _M
AIR	1,51	5,86	4,16	6,66	7,27	5,99	0,67
He-O ₂	1,49	5,22	5,28	3,88	4,99	4,84	0,33
	2,28	5,57	2,78	2,19	3,99	3,63	0,75
	4,38	3,81	4,37	3,09	3,06	3,58	0,31
	8,36	3,54	3,77	2,37	2,51	3,05	0,36
	16,09	2,47	1,54	2,42	1,99	2,11	0,22
	30,79	1,93	1,82	2,12	1,41	1,82	0,15

V. - DISCUSSION

5.1. - Données ventilatoires

Nos résultats ne montrent aucune variation systématique de la ventilation \dot{V}_E avec la pression ambiante. Cette constatation est en accord avec certaines données de la littérature (RAYMOND et Coll. 1968, OVERFIELD et coll. 1969) mais en désaccord avec beaucoup d'autres. En fait cette comparaison ne peut être effectuée correctement que pour des expériences dans lesquelles les constantes physico chimiques de l'ambiance sont voisines si non identiques, ce qui paraît être le cas des deux travaux précités. En effet il est bien connu que \dot{V}_E peut varier en fonction d'un grand nombre de données ambiantes, parmi lesquelles on peut citer, au moins trois facteurs indépendants :

- La pression partielle des gaz respiratoires $P_{I_{O_2}}$ et $P_{I_{CO_2}}$;
- La fraction et la nature du ou des gaz dits neutres qui conditionnent dans une large part les propriétés physiques du mélange (masse volumique, viscosité, conductibilité thermique, etc...);
- Les températures ambiantes dont les échanges énergétiques sont largement dépendants.

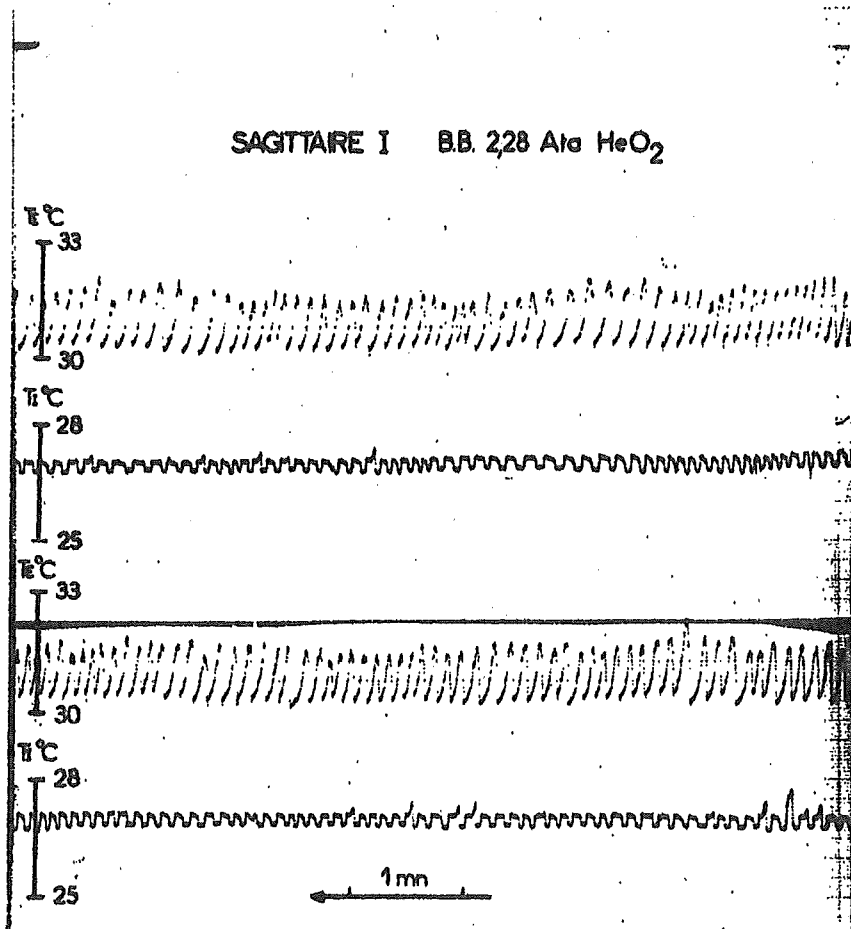
Compte tenu de ces données il semble pouvoir être admis que lorsque $P_{I_{CO_2}}$ est maintenue à un niveau très faible (1 mb) avec une $P_{I_{O_2}}$ comprise entre un éventuel seuil hypoxique (CHOUTEAU et coll. 1971) et le seuil d'apparition des premiers signes hyperoxiques (FELD et coll. 1971) dans une ambiance thermique neutre, la ventilation de repos des sujets en He O₂ n'est pas modifiée jusqu'à 300 m. Il est vraisemblable d'après les données de la littérature que cette conclusion puisse être étendue à l'exercice musculaire. Si par ailleurs le rapport du volume mort au volume courant reste constant en fonction de la pression (SALTZMAN et coll. 1971), la ventilation alvéolaire \dot{V}_A sera dépendante uniquement du volume courant ou de la fréquence. Ce fait justifie l'utilisation comme nous l'avons fait d'une relation $V_D = f (V_T, f)$ (BARGETON et coll. 1967). L'application de cette modalité de calcul nous a permis de conclure à l'absence d'une variation systématique de \dot{V}_A en fonction de la pression, résultat conforme au fait que nous n'avons pas relevé chez nos sujets de variation significative de V_T ou f en fonction de P_B . OVERFIELD et coll. (1971) arrivent à la même conclusion sur \dot{V}_A . Mais dans leur expérience \dot{V}_E et V_T sont en corrélation significativement positive,

alors que f est en corrélation significativement négative avec P_B , ce qui montre bien la contingence de \dot{V}_E . Comme dans notre cas ces auteurs notent par ailleurs une augmentation de \dot{V}_{CO_2} avec la pression et corrélativement un accroissement de PA_{CO_2} , ce qui les amènent à conclure à une relative hypoventilation qui paraît être en rapport plus avec la pression qu'avec la densité du gaz. Dans nos expériences cet accroissement de PA_{CO_2} calculé, est très discret, et peu significatif. Il est présent pour tous nos sujets si l'on compare les valeurs relevées à 1,5 Ata et 30,79 Ata en He O₂ (Fig. 5). Cette observation est à rapporter à l'accroissement de la masse volumique de gaz ventilé qui est 10 fois plus forte à 300 mètres en He O₂ que dans le même mélange à 5 mètres (5,90 gr contre 0,62 gr. par dm³). Cette différence n'est plus systématique si on compare les valeurs trouvées chez nos quatre sujets pour des mélanges iso massiques par exemple 1,5 ata en Air et 8,36. ata en He-O₂ (VARENE et coll. 1970). En la matière, ces expériences ne confirment pas l'impression de SALTZMAN et coll. (1971) selon laquelle l'accroissement de PA_{CO_2} serait plus en rapport avec l'accroissement de pression qu'avec l'accroissement de masse volumique.

Ajoutons à cela que au cours de cette expérience comme dans d'autres (VARENE et coll. 1971) nous avons été frappés par la relative instabilité ventilatoire des sujets au repos en hyperbarie conduisant à la mesure de valeurs de \dot{V}_E , V_T et de f relativement dispersées. (Fig. 7). La même constatation peut être faite à partir de résultats d'étude des variables d'échanges gazeux publiés dans la littérature (BRADLEY et coll. 1971, SCHAEFFER et coll. 1970-1971, SALZANO et coll. 1971). En plus des facteurs précités et qui sont susceptibles d'apporter des éléments de discussion quantifiable on peut ajouter des facteurs plus difficiles à appréhender comme les conditions psychologiques particulières dans lesquelles se trouvent les sujets au cours d'expérience de longue durée dans un caisson de volume réduit, ou le contrôle plus ou moins volontaire du volume courant et de la fréquence respiratoire que les plongeurs professionnels ont souvent acquis à l'entraînement. Sous cet aspect il semble que les expériences réalisées à l'exercice musculaire puissent apporter des résultats plus cohérents.

/...

- FIGURE 7 -



5.2. - Données métaboliques

Nos expériences ne montrent pas de variations systématiques de la consommation d'oxygène avec la pression. Ils sont en cela en accord avec de nombreuses données de la littérature et permettent de conclure que jusqu'à 31 ATA en atmosphère He O₂ il n'y a pas de variation de \dot{V}_{O_2} dans la mesure où la neutralité thermique est recherchée (RODGERS et Coll. 1969, BOWERS et Coll. 1967, OVERFIELD et Coll. 1969, LEON et Coll. 1960, RHOADES et Coll. 1967, FOX et Coll. 1966, EPPERSON et Coll. 1966 ...). Les accroissements de consommation d'oxygène rapportés dans certaines études (SALTZMAN et Coll. 1971, BRADLEY et Coll. 1971, SALZANO et Coll. 1971, SCHAEFER et Coll. 1971) semblent pouvoir être mis en relation avec l'accroissement de la déperdition calorifique dans une ambiance à température trop basse compte tenu des propriétés particulières de l'Hélium (cf. infra). Rappelons à ce sujet que les raisons parfois invoquées, qui font appel à l'accroissement de la puissance mécanique ventilatoire nécessaire à la ventilation d'un mélange dense exige qu'il soit fait l'hypothèse d'un très bas rendement des muscles ventilatoires (OTIS 1954, MURPHY et Coll. 1969). Si à l'inverse on admet que ce rendement est semblable à celui des muscles squelettiques banaux (MARGARIA et Coll. 1960, MILIC EMILI et Coll. 1960, PETIT et Coll. 1962) la consommation d'oxygène des muscles ventilatoires ne peut entraîner d'accroissement significatif de la consommation globale d'oxygène, compte tenu des faibles valeurs de puissance mécanique mesurées au niveau du soufflet thoraco pulmonaire (VARENE et Coll. 1970-71) et dans ce cas, donc, l'accroissement de \dot{V}_{O_2} éventuellement observé ne peut lui être imputé.

Dans le but d'estimer quantitativement les conditions de transfert alvéolo capillaire de l'oxygène en hyperbarie, nous avons calculé à partir de nos résultats expérimentaux le "coefficient d'extraction" E proposé par DEJOURS et Coll. (1970) et appliqué par LEFRANCOIS et Coll. (1971) à l'altitude*. Les résultats sont rapportés dans le tableau XXIII en même temps que ceux de l'équivalent ventilatoire. On constate que ce coefficient E qui est trois fois sur quatre plus élevé à 1,5 Ata d'He O₂ qu'à 1,5 Ata d'Air est dans tous les cas plus faible à 30,8 Ata d'He O₂ qu'à 1,5 Ata d'Air ou d'He O₂. Cette diminution du coefficient d'extraction de l'oxygène en fonction de la pression barométrique pour des ambiances à P_IO₂ constante traduit pensons nous une perturbation des échanges alvéolaires. Il n'y a aucune raison de penser que cette perturbation trouve sa cause dans la perfusion des zones d'échanges, tout porte à croire, au contraire, qu'elle est d'origine ventilatoire (LANPHIER 1967) et plus précisément même,

* - $E = \frac{\dot{V}_{O_2} \text{ STPD}}{\dot{V}_{EBTPS} k P_{IO_2}}$ où k est le facteur de transformation BTPS STPD.
/...

mécanique ventilatoire. Trois interprétations peuvent lui être données, soit la simple dilution de l'oxygène dans le gaz neutre, soit une modification de la distribution trachéo-bronchique en parallèle, soit la création ou l'exagération d'un défaut de distribution intra-lobulaire en série. (VARENE et Coll. 1971). Le fait que dans nos expériences ce coefficient d'extraction augmente lorsque sont comparés les ambiances à 1,5 Ata en Air et en He-O₂ serait en faveur d'une hypothèse de distribution que l'Hélium améliorerait par rapport à l'azote. Il est possible par ailleurs que les phénomènes soient associés.

TABLEAU XXIII

	$\frac{\dot{V}_{EBTSP}}{\dot{V}_{O_2} \text{ STPD}}$			$E = \frac{\dot{V}_{O_2} \text{ STPD}}{\dot{V}_E \text{ BTPS} \times F_{I_{O_2}} \times k}$		
SUJETS	1,5 Ata Air	1,5 Ata He O ₂	30,8 Ata He O ₂	1,5 Ata Air	1,5 Ata He O ₂	30,8 Ata He O ₂
B.B.	32	29	24	0,157	0,179	0,147
B.A.	24	22	25	0,162	0,194	0,143
P.L.	28	32	29	0,138	0,131	0,124
F.S.	27	26	30	0,144	0,161	0,117

Quoiqu'il en soit ces résultats sont en contradiction avec les constatations de SALZANO et Coll. (1971) et SCHAEFFER et Coll. (1971). Ces auteurs relevant une diminution de l'équivalent ventilatoire consécutif à l'accroissement de \dot{V}_{O_2} concluent à l'amélioration des conditions de transfert de O₂ en plongée. Outre le fait que l'équivalent ventilatoire, ainsi qu'on peut le voir sur le tableau, fournit des résultats moins constants que le coefficient d'extraction, les conclusions tirées par les auteurs précités nous paraissent injustifiées ne serait-ce que pour que les comparaisons portent sur des ambiances à $P_{I_{O_2}}$ différentes.

/...

Si dans nos expériences \dot{V}_{O_2} ne paraît pas varier significativement avec la pression, le quotient respiratoire R pris pour l'ensemble de nos sujets augmente très significativement avec la pression ($P < 0,001$) cf. tableau XII et XIII). En marge des variations individuelles qui montrent une diminution de \dot{V}_{O_2} pour FS et un accroissement de \dot{V}_{CO_2} pour BA et BB, ce fait peut être mis en relation avec \dot{V}_{CO_2} qui rapporté à la surface cutanée A , croît avec P_B lorsque tous les sujets sont groupés ($P < 0,06$). Il convient de remarquer que si il est admis, ce qui est classique, que P_{ACO_2} croît avec la pression, pour une ventilation alvéolaire \dot{V}_A constante, ce qui est fréquemment observé, on doit conclure que \dot{V}_{CO_2} augmente du fait de la relation liant ces trois variables (équation 16) et par voie de conséquence que R augmente si \dot{V}_{O_2} est stable.

Cependant cette remarque ne fournit pas l'explication de cet accroissement de \dot{V}_{CO_2} et de R/^{qui} en régime stable ne peut avoir qu'une origine métabolique.

Lorsque l'on se reporte aux données de la littérature on peut constater que souvent le quotient respiratoire varie ou même croît en fonction de P_B dans les expériences effectuées en He O_2 hyperbare. (SALTZMAN et coll. 1971, BRADLEY et Coll. 1971, BROUSSOLLE et Coll. 1971) mais le calcul de R est le plus souvent présenté comme une validation des mesures de \dot{V}_{O_2} et \dot{V}_{CO_2} et non dans le but de fournir un paramètre physiologique à discuter.

En l'absence d'une explication très motivée de cette variation de R qui, quoiqu'il en soit, demande confirmation, nous évoquerons trois hypothèses :

- L'erreur métrologique ne peut évidemment pas être exclue à priori, compte tenu des faibles pressions partielles de CO_2 et O_2 mesurées dans les échantillons extraits du caisson. Cependant cette erreur ne paraît pas imputable aux méthodes d'analyse puisque le dosage chromatographique donne les mêmes résultats que le spectrophotomètre infrarouge pour le CO_2 et la cellule à combustible pour l'oxygène. En ce qui concerne, la technique de prélèvement des échantillons, une pollution éventuelle à l'intérieur du caisson ne modifierait pas R, et une pollution extérieure serait facilement détectable par les valeurs énoncées de \dot{V}_{O_2} et \dot{V}_{CO_2} qu'elles entraîneraient. Reste le rôle des mélanges étalon. Ce ne sont évidemment pas les mêmes qui ont été employés tout au long de l'expérience puisque les Pressions partielles mesurées à l'extérieur du caisson variaient en fonction de la pression

à l'intérieur. Bien que vérifiés il n'est pas exclu qu'on puisse leur imputer une erreur systématique. On doit remarquer cependant que si erreur il y a elle est faible, mais R demeurant toujours dans les limites physiologiques, critère de validité généralement utilisé dans de telles études, et qu'elle ne porte que sur VCO_2 .

Sous l'angle physiologique on peut invoquer les conditions de vie des sujets dans un espace relativement réduit restreignant leurs possibilités de déplacement donc d'exercice physique. On peut noter que pendant ce laps de temps leur poids a légèrement diminué. A l'encontre de cette hypothèse on doit remarquer que le régime alimentaire, tant en ce qui était offert aux sujets que ce qu'ils consommaient n'a pas été modifié au cours de l'expérience.

Enfin demeure l'hypothèse d'un éventuel effet au niveau du métabolisme cellulaire, soit de l'hélium, soit de la pression. Ce problème a été très largement discuté au dernier symposium de underwater physiology (LANDAU 1971, FEATHERSTONE et coll. 1971, LEVER et coll. 1971) mais dans l'état actuel des connaissances un large fossé demeure entre les faits observés d'une part au niveau cellulaire ou moléculaire pour des pressions très élevées, d'autre part au niveau des organismes entiers dans le domaine actuel des pressions explorées.

5.3. - Le confort thermique en hyperbarie

Le confort thermique est bien souvent remis en cause au cours des expériences en milieu $He-O_2$ hyperbare par les sujets qui se plaignent habituellement du froid. Le caractère subjectif de l'appréciation du confort rend toujours très difficile son évaluation. Déjà en conditions normobares en air il faut prendre en considération de multiples facteurs : T. sèche, T. parois, T. humide, Vitesse de l'air, Activité du sujet, Vêtement (FANGER 1970). La modification du mélange gazeux et de sa pression ajoute encore de nouveaux éléments à prendre en considération. C'est dire qu'il n'est pas possible sur ces simples résultats, qui poursuivaient d'ailleurs d'autres buts que l'étude du confort, d'établir des règles précises.

Il faut cependant retenir que les températures d'ambiances (sèche et parois) étaient à la limite et dans certains cas en dessous du confort frais, ceci, d'après l'appréciation des sujets et l'examen des résultats concernant essentiellement la température cutanée, la température rectale et le stockage ou la dette thermique. Ces températures considérées comme une limite inférieure confortable, correspondent à la limite supérieure de la zone de confort donnée par WEBB (1970). Cette différence d'appréciation

est tout à fait logique car dans les cas rapportés par WEBB, les sujets avaient une activité légère et portaient des vêtements alors que dans le cas présent, les sujets étaient au repos complet en position couchée et ne portaient aucun vêtement.

Ces résultats font également ressortir que la valeur de la température cutanée moyenne reste un excellent repère pour apprécier le confort, et les limites données en conditions normobares restent valables. On peut en effet considérer qu'en dessous de 33°C pour \bar{T}_s le confort n'est plus assuré. Ce chiffre peut éventuellement être retenu comme repère dans les mises au point d'équipements isolants et chauffants destinés aux plongeurs.

Une dernière notion doit être avancée : en raison de la valeur élevée du coefficient d'échange thermique par convection hc , et de la masse considérable des gaz ventilés, l'équilibre thermique du corps humain doit être considéré comme fragile. Il suffit d'une baisse de la température ambiante de quelques degrés pour accroître de façon extrêmement importante la déperdition thermique. Par exemple au niveau de la peau, si la température des gaz baisse de 10°C, on pourra prévoir une perte de chaleur de l'ordre de 200 Watt/m² à 31 Ata alors qu'en conditions normobares, la même baisse thermique n'entraînera pas de déperdition supérieure à 20 Watt/m². Il en va évidemment de même pour les voies respiratoires où le refroidissement sera encore accru s'il y a en outre une hyperventilation. Ceci permet de supposer que la zone de confort est très étroite entre le chaud et le froid et correspond chaque fois à une activité, et une protection vestimentaire donnée. Toute modification de ces deux conditions doit obligatoirement entraîner un déplacement de la zone confortable.

5.4. - Echanges par convection cutanée : Détermination du coefficient d'échange thermique par convection "hc"

Le phénomène essentiel des échanges thermiques en Hélium hyperbare est l'accroissement de la convection. En réalité ce phénomène est partiellement atténué du fait de la diminution de la différence de température peau-ambiance. Ainsi, à 31 ATA, les valeurs de C sont du même ordre de grandeur que les valeurs de R à 1,5 ATA (fig. 8). Leur évolution en fonction de la pression ne suffit donc pas pour caractériser, comparer et prévoir ces échanges à différents niveaux. Pour cela, il convient de déterminer le coefficient d'échange thermique, c'est à dire, de ramener les valeurs des échanges à un écart de température peau-ambiance de 1°C :

$$hc = \frac{C}{T_a - T_s} \quad (6)$$

/...

- FIGURE 8 -

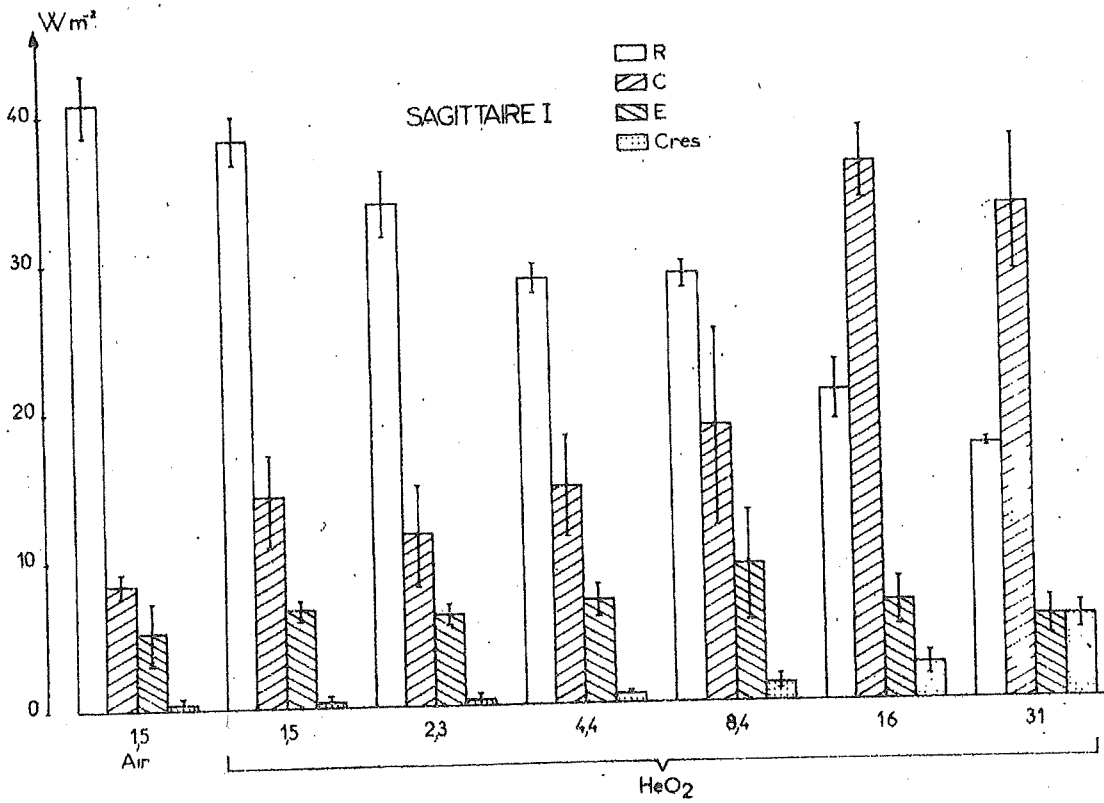


TABLEAU XXIV

Coefficient d'échange thermique par convection : hc
 ($hc = \text{Watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$; \bar{m} = moyenne ; S_M = écart type
 de la moyenne)

milieu	P_B	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S_M
AIR	1,51	1,20	2,60	1,26	1,02	1,52	0,36
He-O ₂	1,49	3,96	1,24	2,47	4,08	2,94	0,67
"	2,28	3,62	1,94	3,02	3,47	3,01	0,38
"	4,38	2,21	4,60		5,14	3,98	0,90
"	8,36	3,69	4,17	12,04	6,54	6,61	1,91
"	16,09	13,28	20,47	15,59	21,04	17,60	1,89
"	30,79	13,80	14,04	21,15	25,16	18,54	2,79

Le tableau XXIV montre les valeurs individuelles et les moyennes du coefficient d'échange par convection hc par niveau de pression. Il montre un accroissement très important de hc avec la pression. Pratiquement, il est multiplié par 12 quand on passe de 1,5 ATA en air à 31 ATA en Hélium. Il existe inévitablement une dispersion assez importante des résultats qui est due à la difficulté des conditions expérimentales et vraisemblablement à l'absence de déplacement forcé des gaz de la sphère. Du fait du grand volume de la sphère, le renouvellement des gaz à l'intérieur se faisait très lentement et il n'y avait pas de vent appréciable. Il s'agit là de conditions défavorables pour mesurer hc , car la température des gaz n'est pas homogène autour du sujet et à distance de celui-ci. A défaut de pouvoir opérer dans des conditions plus rigoureuses et en l'absence d'autres données au-dessus de 14,6 ATA (RAYMOND et coll. 1968), ces résultats constituent néanmoins une base de discussion des échanges par convection.

Un mode d'expression plus synthétique a été recherché pour décrire le phénomène. Deux types de relation ont été établies :

- une relation linéaire du type $hc = b x + a$
- une fonction puissance du type $hc = b x^a$.

/...

Les constantes a et b de ces équations ont été établies en fonction de certaines variables d'ambiance "x" = P_B , ρ , ρ/ρ_0 pour le mélange He- O_2 . Afin de pouvoir inclure les valeurs relevées en air, ces caractéristiques ont été groupées selon la présentation de WEBB, "convective constant" et "convective character".

Les tableaux XXV et XXVI ainsi que les figures 9, 10, 11, 12, 13 présentent ces résultats. Les graphiques font ressortir dans certains cas le peu de différence qui existe entre la représentation linéaire et celle sous forme de fonction puissance. C'est tout particulièrement vrai pour les figures 10 et 11 qui concernent ρ et ρ/ρ_0

La divergence la plus grande concerne le rapport $k\rho_c/\eta$ (fig. 12). En fait si la représentation linéaire semble bien convenir pour décrire les résultats aux pressions les plus élevées, elle est plus discutée aux faibles pressions. En effet lorsque celle-ci est nulle, hc est nul également. De ce point de vue la fonction puissance paraît plus proche de la réalité, car la relation linéaire comporte toujours une ordonnée à l'origine.

La comparaison de ces résultats avec les publications antérieures doit être discutée. La plupart des données antérieures concernent l'air et comportent du vent, mais le plus souvent les équations proposées ne font pas la part de ce qui revient à la convection naturelle, si bien que d'après celles-ci, lorsque $v = 0$, $hc = 0$ ce qui n'est pas possible. Les échanges thermiques par convection naturelle ont été étudiés par HARDY et DUBOIS (1937) qui proposent dans l'air calme des valeurs de 0,9 à 1,6 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ à 1 ATA. Ceci est assez compatible avec ce qui a été trouvé dans le cas présent à 1,5 ATA (en moyenne 1,52). Les résultats de COLIN et HOUDAS (1967) sont un peu plus élevés : 2,7 $W/m^2 \cdot ^\circ C$. Il est vrai qu'ils ont été obtenus par extrapolation de mesures effectuées avec du vent ce qui sur un plan théorique est préférable.

Le passage de l'air à l'hélium accroît les échanges convectifs, pratiquement en les multipliant par 2 à 1,5 ATA (tableau XXIV). L'accroissement du coefficient hc avec la pression en milieu He- O_2 est représenté par l'équation $hc = 1,66 P_B^{0,71}$. Dans celle-ci on peut remarquer que la valeur de l'exposant : 0,71 est proche de celle prévue par MITCHELL et Coll. (1969) : 0,6 et TIMBAL et Coll. (1970) sur les données antérieures de COLIN et HOUDAS (1967) : 0,67.

TABLEAU XXV

Valeurs de b et a lorsque hc est mis en relation avec diverses variables x selon : $hc = b x^a$

$$hc = \text{Watt} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

milieu	x	unité de x	n	b	a	r
He-O ₂	P _B	Bar	23	1,66	0,71	0,88
	ρ	kg/ m ³	23	3,86	0,96	0,89
	$\rho/\rho^0_{(1)}$	sans	23	0,96	1,76	0,89
He-O ₂ + air	$k\rho c/M$	(2)	27	0,60	0,63	0,90
	$(k\rho c/M)$	sans	27	0,88	0,63	0,90
	$(k\rho c/M)_0_{(3)}$					

TABLEAU XXVI

Valeurs de b et a lorsque hc est mis en relation avec diverses variables x, selon : $hc = bx + a$
($hc = \text{Watt}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

milieu	x	unité de x	n	b	a	r
He-O ₂	P _B	Bar	23	0,59	2,50	0,85
	ρ	kg/ m ³	23	3,33	1,33	0,85
	$\rho/\rho^0_{(1)}$	sans	23	1,33	1,47	0,85
Air + He-O ₂	$k\rho c/M$		27	0,085	2,24	0,87
	$(k\rho c/M)$	sans	27	0,16	2,24	0,87
	$(k\rho c/M)_0_{(3)}$					

(1) - ρ = masse volumique à 1 Bar.

(2) - Dans cette expression, les unités sont les suivantes :
 $k = 10^{-3} \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{K}.$
 $= \text{kg}/\text{m}^3$
 $C = \text{J}/^\circ\text{K} \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
 $= 10^{-6} \text{ Pl (Poiseuille)}$

(3) - $(k\rho c/M)_0$ = "Convective Constant" à 1 Bar en air.

FIGURE 9

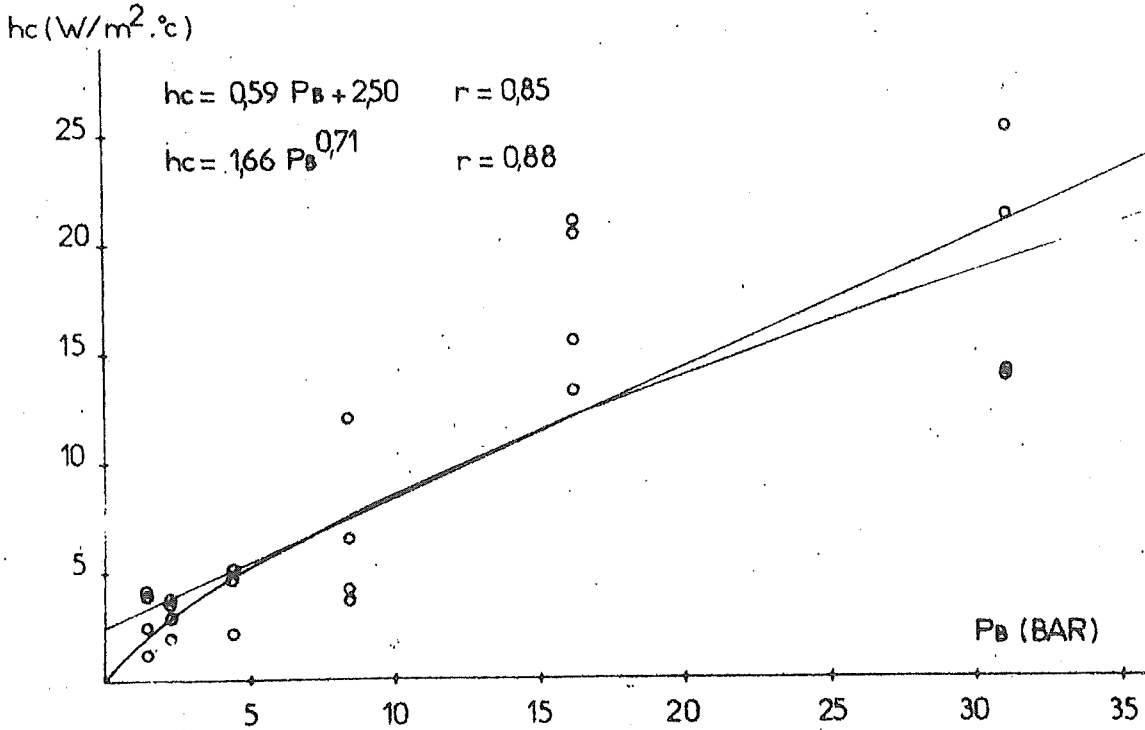


FIGURE 10

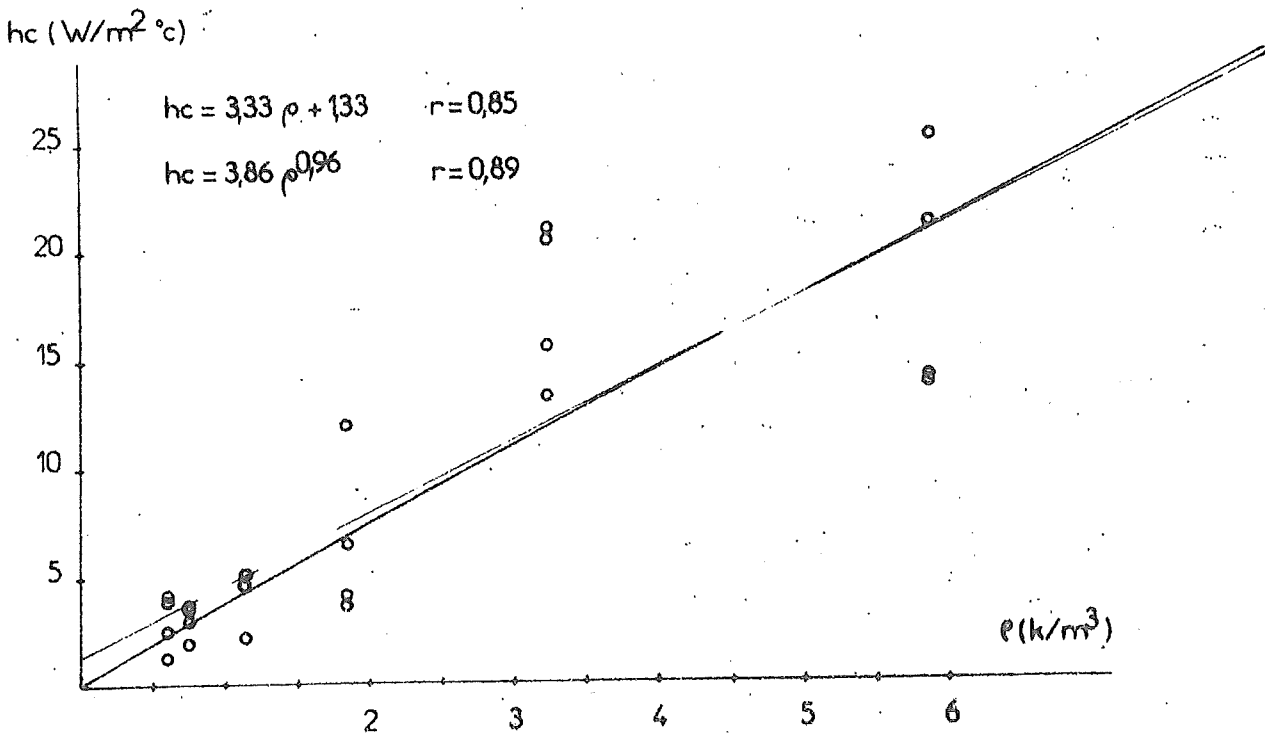


FIGURE 11

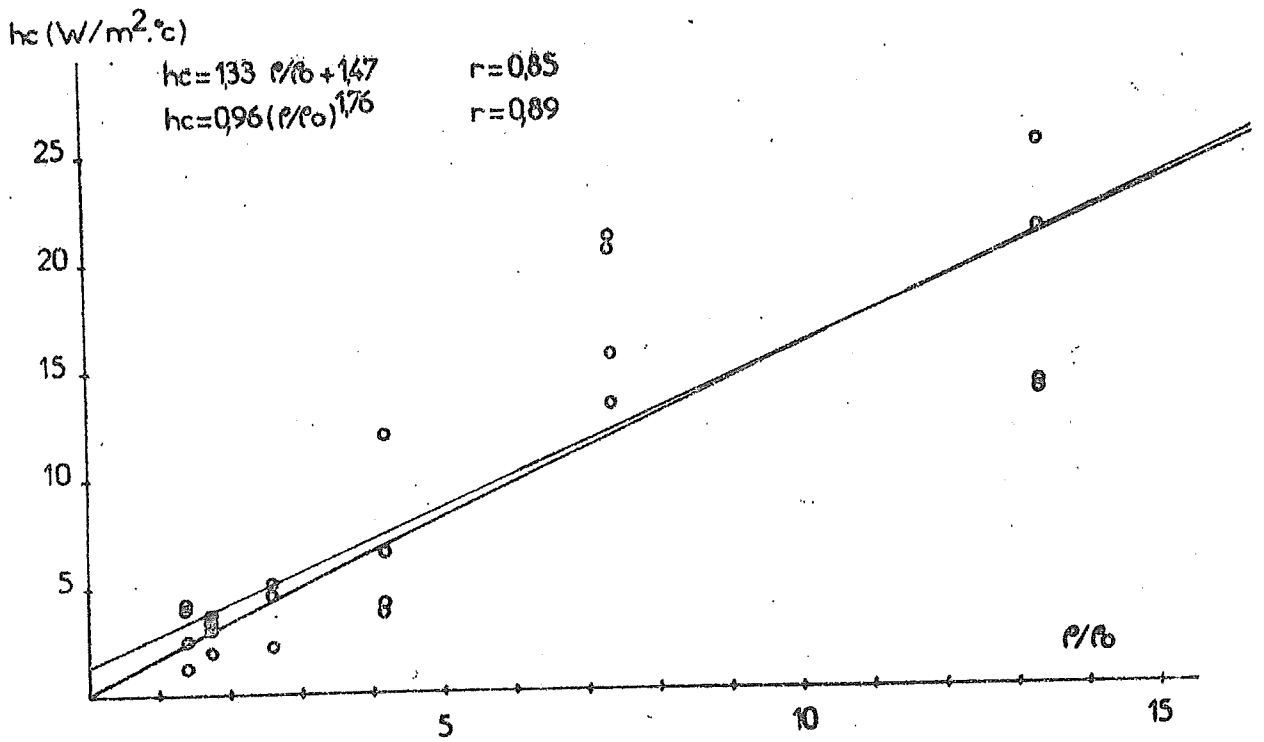


FIGURE 12

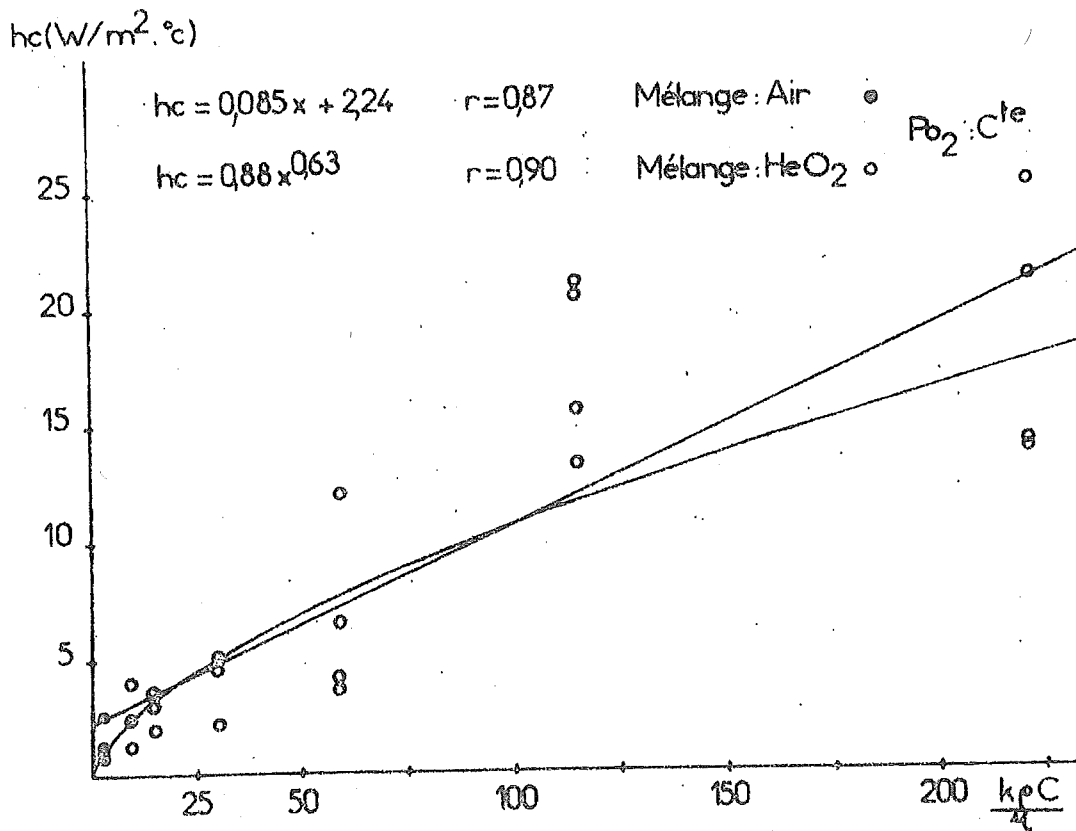
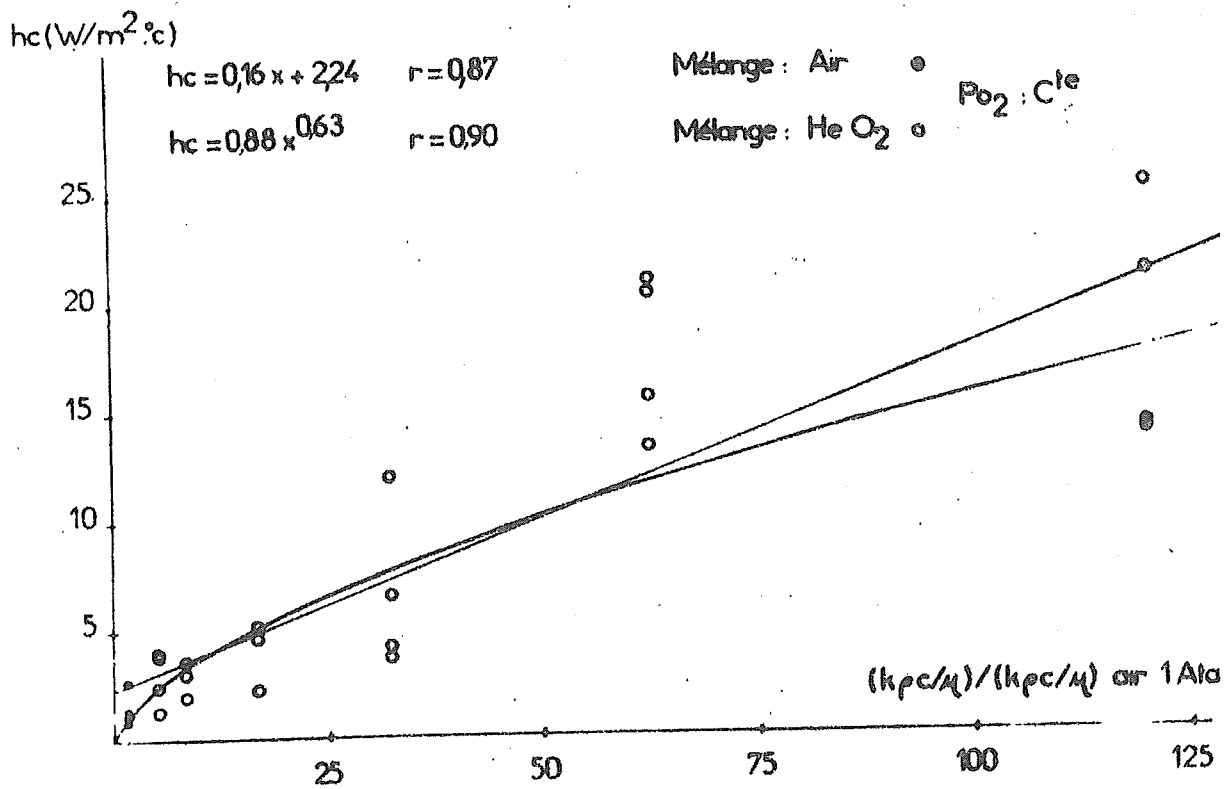


FIGURE 13



Par rapport aux résultats de RAYMOND et Coll. (1968), les chiffres trouvés ici sont plus faibles. Ceci peut en partie s'expliquer parce que ces auteurs n'ont pas déduit la convection respiratoire dans leurs calculs. Ils surestiment donc quelque peu la valeur de h_c , surtout aux pressions élevées. Mais même si la correction avait été effectuée, il est très vraisemblable que leurs valeurs seraient restées très largement supérieures aux nôtres. De plus, les auteurs calculent les échanges par radiation selon l'équation de EPPERSON et Coll. (1966), qui fait appel à la température globe et non à la température réelle des parois. Comme ces dernières sont vraisemblablement plus froides que les gaz de l'ambiance et donc du globe, la radiation est sous-estimée. Par voie de conséquence C est surestimé de même que h_c . Enfin, dans cette comparaison, il existe une inconnue qui concerne le mode de détermination du stockage à partir de T_{re} et \bar{T}_s . Il est possible que le choix de coefficients de pondération différents puisse rendre compte des quelques différences entre les deux groupes de résultats.

Le coefficient combiné d'échange thermique par radiation et convection est donné pour mémoire dans le tableau XVII. Il est la somme de h_r et h_c . Comme h_r intervient pratiquement comme une constante (cf tableau XVI) les variations de h ne dépendent que de celles de h_c .

TABLEAU XXVII

Coefficient combiné d'échanges thermiques par radiation et convection : h
 ($h = \text{Watt/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; \bar{m} = moyenne ; S_M = écart type de la moyenne).

milieu	P_B	B.B.	B.A.	P.L.	F.S.	\bar{m}	S_M
AIR	1,51	6,44	7,94	6,60	6,39	6,84	0,37
He - O ₂	1,49	9,33	6,62	7,86	9,50	8,33	0,68
"	2,28	8,89	7,37	8,80	8,89	8,49	0,37
"	4,38	7,64	10,06	-	10,57	9,42	0,90
"	8,36	9,13	9,59	17,52	12,00	12,06	1,93
"	16,09	18,80	25,98	21,10	26,49	23,09	1,88
"	30,79	19,40	19,59	26,68	30,62	24,07	2,76

/...

5.5. - Effet de l'inhalation de gaz refroidis

La déperdition thermique par convection respiratoire est d'autant plus élevée que la température du gaz inspiré est plus faible et que la pression est plus élevée. Les valeurs trouvées dans ces expériences sont en accord avec les prévisions antérieurement présentées (VARENE et Coll. 1970-1971). L'importance de ce phénomène est particulièrement évidente lorsque on rapporte la dissipation d'énergie par convection respiratoire au métabolisme des sujets (figure 14). A 300 mètres 10 % du métabolisme est dissipée par cette voie si le gaz est inhalé à 32°C ce chiffre passe à 60 % si le gaz est inhalé à 10°C. Un autre avantage de cette représentation est qu'elle peut s'appliquer à l'exercice musculaire modéré et moyen, domaine dans lequel \dot{V}_{O_2} est proportionnel à \dot{V}_E .

En ce qui concerne la métrologie, il ne semble pas que les hypothèses faites pour les mesures de \bar{T}_I et \bar{T}_E entraînent de grosses erreurs d'estimation, en effet elles doivent frapper dans le même sens T_I et T_E et donc se compenser relativement.

Dans ces expériences en He-O₂ comme dans les expériences en Air une relation linéaire de la forme $T_E = a + b T_I$ peut être décrite entre T_E et T_I . Les valeurs des coefficients a et b par contre sont sensiblement différentes de celles que nous avons précédemment trouvées pour l'air. Vraisemblablement, cependant, cette différence n'est pas liée à la nature du gaz mais plutôt à l'humidité du gaz inspiré. En effet en Air et He-O₂ secs nous avons pu mesurer des coefficients a et b identiques au cours d'expériences complémentaires effectuées au Laboratoire de Brétigny à pression barométrique normale alors qu'à l'inverse l'air relativement humide fourni des valeurs voisines de celle du mélange He-O₂ utilisé au cours de l'expérience SAGITTAIRE I décrite ici. (Tableau XXVIII). Par contre, si au lieu d'étudier la relation sujet par sujet pour l'ensemble des pressions on l'étudie pour l'ensemble des sujets à chaque niveau de pression on constate une croissance assez régulière du coefficient b qui pourrait traduire l'effet de l'accroissement de la ventilation molaire ou STPD sur le fonctionnement de l'échangeur thermique ventilatoire, phénomène que nous n'avions pas pu mettre en évidence antérieurement (VARENE et Coll. 1970).

Pendant l'inhalation de gaz refroidis nous n'avons pas constaté d'accroissement de la consommation d'oxygène et ceci peut paraître surprenant. En fait cela peut être expliqué de façon simple : en effet les réactions thermogénétiques ne sont déclenchées que lorsque une dette thermique appréciable tend à faire varier les températures corporelles.

(HARDY et COLL. 1972). A partir des valeurs que nous rapportons cette dette est calculable sur les 20 minutes pendant lesquelles durait l'inhalation de gaz froids : si on estime à 60 watts la déperdition thermique par convection respiratoire (60 % d'un métabolisme de repos de 100 watts) la quantité d'énergie totale perdue par cette voie en 20 minutes est $60 \times 60 \times 20 = 7\ 200\text{ J}$. Or, pour un homme de 80 kgs la capacité calorifique totale est calculée en multipliant ce chiffre par la chaleur spécifique généralement considérée comme égale à 3 472 Joules par kg et par °C ($0,83\text{ Kcal kg}^{-1}\text{ °C}^{-1}$). On obtient le chiffre de 277.760 Joule °C⁻¹. On peut donc prévoir au bout de 20 minutes une variation thermique de l'ordre de :

$$\frac{72.000}{277.760} = 0,25^{\circ}\text{C}.$$

C'est effectivement l'ordre de grandeur de la variation observée sur Tre mais elle est insuffisante semble-t-il, compte-tenu de son étalement sur 20 minutes pour déclencher une réaction thermorégulatrice nette qui se traduirait par un accroissement significatif de $\dot{V}O_2$.

/...

FIGURE 14

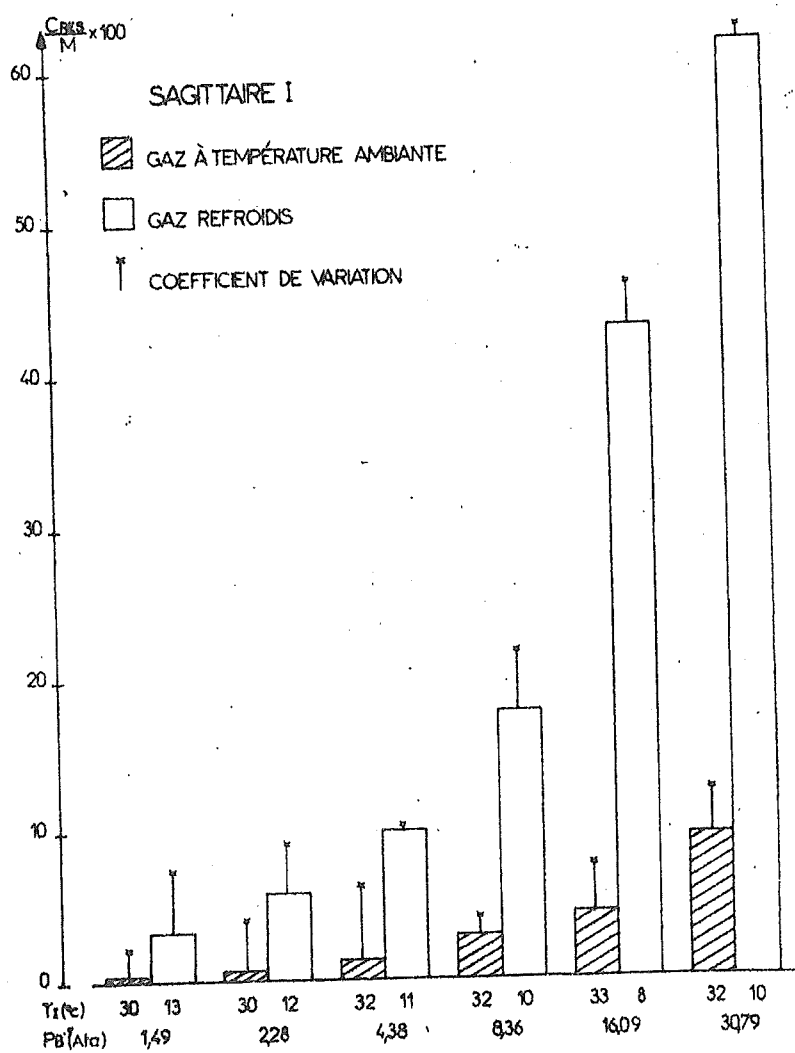


TABLEAU XXVIII

Régressions linéaires $T_E = a \pm b T_I$

Expérience	Conditions	Sujets	P_B	a	b	r	n	p
Sagittaire I	He O ₂ humide	B.B.	1,5 à 31 Ata	26,40	0,245	0,96	13	0,001
"	"	B.A.	-	27,77	0,211	0,96	12	0,001
"	"	P.L.	-	28,56	0,182	0,91	14	0,001
"	"	F.S.	-	26,86	0,248	0,95	14	0,001
Sagittaire I	He O ₂ humide	4 sujets	1,5 Ata	27,78	0,178	0,98	8	0,001
"	"	"	2,3 Ata	28,97	0,155	0,81	8	0,05
"	"	"	4,4 Ata	26,86	0,235	0,99	8	0,001
"	"	"	8,4 Ata	26,90	0,242	0,99	8	0,001
"	"	"	16,1 Ata	27,51	0,237	0,94	7	0,01
"	"	"	31 Ata	26,43	0,270	0,95	8	0,001
Sagittaire I	Air Humide	3 sujets	1,5 Ata	28,69	0,177	0,96	6	0,01
Brétigny 71	He O ₂ Sec	P.V.	1 Ata	21,81	0,351	0,97	12	0,001
"	(± CO ₂)	J.L'H	-	23,01	0,324	0,99	12	0,001
"		H.V.	-	21,43	0,379	0,95	15	0,001
Brétigny 71	Air Humide	P.V.	-	26,88	0,204	0,99	6	0,001
"	(± CO ₂)	J.L'H	-	26,82	0,195	0,98	9	0,001
"		H.V.	-	26,02	0,208	0,90	18	0,001
Brétigny 70	Air sec	P.V.	1 à 5 Ata	24,54	0,340	0,93	12	0,001
"	(± CO ₂)	Y.A.	-	24,06	0,329	0,54	23	0,01

VI. - CONCLUSIONS

=====

Cette expérience conduite en milieu hélium oxygène de 1,5 à 30,79 ATA a été réalisée chez quatre sujets nus, couchés et au repos, maintenus aussi près que possible de la neutralité thermique.

Elle permet de tirer les conclusions suivantes en ce qui concerne l'évolution des éléments du bilan thermique en milieu hyperbare.

1 - Le métabolisme estimé par la consommation d'oxygène ne montre pas de variation significative en fonction de la pression ambiante. A l'inverse, une augmentation sensible du rejet de CO_2 conduit à un accroissement du quotient respiratoire.

Les variables ventilatoires (ventilation et ventilation alvéolaire) ne varient pas non plus en fonction de la pression.

La pression partielle de CO_2 alvéolaire (PA_{CO_2}) augmente sensiblement avec la pression.

Si l'on exclu la mise en évidence d'un coefficient d'extraction pour l'oxygène progressivement décroissant, il apparaît que les conditions des échanges gazeux pulmonaires sont très peu modifiées dans les modalités de nos expériences.

2 - L'évaporation due à la perspiration insensible cutanée et respiratoire, n'est pas modifiée par la pression et reste du même ordre de grandeur que celle des conditions normobares. L'hygrométrie relativement élevée n'a pas constitué un facteur limitant à l'évaporation de la perspiration mais le problème reste entier en ce qui concerne les possibilités d'évaporation de la sudation au cours d'un éventuel travail musculaire.

3 - Les pertes thermiques par radiation ont diminué avec l'accroissement de la pression. Mais cela traduit plus la diminution de l'écart de température entre la peau et les parois, qu'une quelconque modification des lois d'échange thermique par radiation.

4 - Le stockage ou la dette thermique calculés à partir de l'évolution des températures corporelles sont restés peu importants étant donné les conditions expérimentales proches de la neutralité thermique.

5 - Les pertes thermiques par convection respiratoire ont montré un accroissement fonction à la fois de la pression ambiante et de la température des gaz inspirés jusqu'à atteindre 60 % du métabolisme de repos à 300 m et pour une température de gaz inhalés de 10° centigrades (contre 0,5 % à 5 m et pour un gaz inspiré à 30°).

6 - Les pertes énergétiques par convection cutanée augmentent de façon très nette en fonction de la composition du milieu (He O_2) et de la pression ambiante.

Ce fait se traduit par un accroissement du coefficient d'échanges thermiques par convection ($hc = W/m^2 \cdot ^\circ C$).

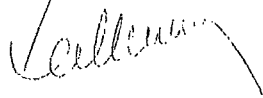
Ce coefficient a été mis en relation avec les différentes variables physiques de l'ambiance, en particulier la pression et la masse volumique des gaz, la densité, etc...

La représentation par une fonction puissance semble préférable. Ainsi, en fonction de la pression elle serait : $hc = 1,66 PB^{0,71}$.

Le Médecin en Chef de 2ème classe P. VARENE
Professeur Agrégé du Service de Santé des Armées

P.O.

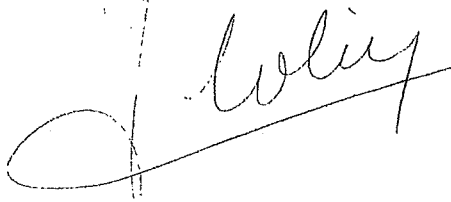
Le Médecin de 2ème classe H. VIEILLEFOND
Assistant de Recherche du Service de Santé des Armées



Le Médecin de 1ère classe J. TIMBAL
Professeur Agrégé du Service de Santé des Armées.



Le Médecin en Chef de 1ère classe J. COLIN
Médecin-Chef du C.E.V. et du L.A.M.A.S.



BIBLIOGRAPHIE

- AOKI, K.H. - TANAKA, M. - HIRAMATSU, K. - KANESHINA, S.
Bovine serum albumin exposed to high pressure.
Biochim. Biophys. Acta 1968 (n° 160) p. 368-377.
- ATWATER, W.O. -- BENEDICT, F.G.
A respiration calorimeter.
Carnegie Institution of Washington
1905 Publ. n° 42.
- BARGETON, D. - DANON, G. - FLORENTIN, E. - TEILLAC, A.
Etude du volume mort respiratoire au cours de la respiration de repos et à l'exercice musculaire modéré.
J. Physiol. (Paris) 1967, 59 1 bis, 206-207.
- BOTTOMLEY, T.A. -- ROTH, E.M.
Thermal environment:
in Compendium of Human response to the Aerospace environment:
Vol. 1 Section 6 N.A.S.A. Washington DC 1968.
- BOWERS, W.R. - FOX, L.E.
Metabolic and thermal responses of man in various He O₂ and air environments.
J. App. Physiol. 1967, 23 (4) 561-565.
- BRADLEY, M.E. - ANTHONISEN, N.R. - VOROSMARTI, J. - LINAWEAVER, P.G.
Respiratory and cardiac responses to exercise in subjects breathing Helium-Oxygen Mixtures at pressure from sea level to 19,2 Ata.
in Underwater Physiology.
C.J. LAMBERTZEN - Ed.-A.P. Publ. 1971 325-338.
- BROKAW, R.S. -
Approximate formulas for viscosity and thermal conductivity of gas mixtures.
Lewis Research Center Cleveland Ohio
Nov. 1964 NASA-TN-D-2502.
- BROUSSOLLE - HYACINTHE - BURNET, H. - BATTISTI, A. - CRESSON, D.
Echanges gazeux respiratoires, mécanique ventilatoire au cours d'une plongée fictive à 51 Ata en mélange He O₂.
Rapport n° 72-1 du CERB 1972.
- BURTON, A.C. -
Human calorimetry.
II. The average temperature of the tissues of the body.
J. Nut. 1935, 2, 261-280.

/...

- CALDWELL, P.R.B. - GOMEZ, D.M. - FRITTS, H.W. Jr. -

Respiratory heat exchange in normal subjects and in patients with pulmonary disease.

J. Appl. Physiol. 1969 25 (1) 82-88.

- CHOUTEAU, J. -

Respiratory gas exchange in animals during exposure to extreme ambient pressures.

In Underwater Physiology C.J. LAMBERTSEN éd. A.P. N.Y. London Publ. 1971 385-398.

- CLIFFORD, J. - KERSLAKE, D.Mck - WADDELL, J.L. -

The effect of wind speed on maximum evaporative capacity in man.

J. Physiol. (London) 147, 253-259 1959.

- COLIN, J. - HOUDAS, Y. -

Experimental determination of coefficient of heat exchanges by convection of human body.

J. Appl. Physiol. 1967, 22, 31-38.

- COLIN, J. - HOUDAS, Y. - BOUTELIER, C. -

Détermination expérimentale de la surface effective de radiation thermique chez l'homme.

C.R. Acad. Sc. Paris 1966, 262, 1966-1969.

- COLIN, J. - TIMBAL, J. - HOUDAS, Y. - BOUTELIER, C. - GUIEU, J.D.

Computation of mean body temperature from rectal and skin temperature.

J. Appl. Physiol. 1971, 31, 484-489.

- COOK, S.F. and GIRAGOSSINTZ, G. -

Effect of low pressure on the respiration of animal tissues.

Univ. Calif. Publ. Physiol.

1931 7 (15) 237-242.

- COOK, S.F. and SOUTH, F.E. -

Helium and comparative invitro metabolism of mouse tissue slices.

Am. J. Physiol. 1953, 173, 542-544.

- COOK, S.F. - SOUTH, F.E. - and YOUNG, D.R. -

Effect of helium on gas exchange of mice.

Aner. 1951 164 p. 248-250.

J. Phys.

- DEJOURS, P. - GAREY, W.F. - RAHN, H. -

Comparaison of ventilatory and circulatory flow rates between animals in various physiological conditions.

Resp. Physiol. 1970 9 108-117.

- EPPERSON, W.L. - QUIGLEY, D.G. - ROBERTSON, W.G. - BEHAR, V.S. - WELCH, B.E. -

Observation on man in oxygen helium environment at 380 mmHg total pressure III. Heat exchange.

Aerospace Med. 1966 457-462.

/...

- FANGER, P.O. -

Thermal comfort.
Danish Technical Press. Copenhagen 1970 244 p.

- FEATHERSTONE, R.M. - HEGEMAN, S. - SETTLE, W.

Effects of inert gas pressures on protein structure and function.
In Underwater Physiology, édité by C.J. Lambertsen 1971, 95 - 100.

- FELD, J.N. - BARDIN, H. - LAMBERTSEN, C.J. -

Maximal use of O₂ in underwater operations.
Aerospace Association Meetings - avril 1971.

- FENN, W.O. - RAHN, H. - OTIS, A.B. -

A theoretical study of the composition of the alveolar Air at altitude.
~~Arch~~ J. Physiol. 1946, 146, 637-653.

- FLORENTIN, E. - CHASSAIN, A. -

Influence de l'inhalation d'air froid sur la ventilation pulmonaire chez l'homme.
Journal Physiol 1964, 56 n°2 193 - 211.

- FOX, E.L. - WEISS, H.S. - BARTELS, R.L. - HIATT, E.P. -

Thermal responses of man during rest and exercise in a Helium oxygen environment.
Ach. Environ. Health 1966, 13 23-28.

- GAGGE, A.P. - HARDY, J.D. -

Thermal radiation exchange of the human by partitioned calorimetry.
J. Appl. Physiol. 1967, 23, 248-258.

- GUIEU, J.D. - BOUTELIER, Ch., TIMBAL, J.

Evaluation d'un coefficient combiné d'échange par radiation et convection chez l'homme/^{nu} en ambiance froide.
J. Physiol. (Paris) 1968, 60 suppl. 2, 454-455.

-

Hand book of physics
Edited by E.U. London and H. Odislaw
New-York Mc Graw-Hill.
1958 p. 5-55 5-56.

- HARDY, J.D. -

Heat transfer. In : Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing, edited by L.H. Newburg.
Philadelphia, London : Saunders, 1949, chap. 3.

- HARDY, J.D. - DUBOIS, E.F. -

The technic of measuring radiation and convection.
J. Nutr. 1938, 15, 461-475.

- HARDY, J.D. - DUBOIS, E.F. -

Basal metabolism, radiation, convection, and evaporation at temperatures from 22°C to 35°C.
J. Nutr. 15 : 477-492, 1938.

/...

- HARDY, J.D. - STOLWIJK, A.J. - GAGGE, A.P. -

Man.

In comparative physiology of thermoregulation.

Vol. II : Mammals.

Academic Press. New-York and London

1971 - 328-380.

- HOUDAS, Y. - COLIN, J. -

Echanges thermiques et hydriques par les voies respiratoires de l'homme.
Path. Biol. 1966 14 (3-4) 229-238.

- HOUDAS, Y. - COLIN, J. - TIMBAL, J. - BOUTELIER, C. - GUIEU, J.D. -

Skin temperatures in warm environments and the control of sweat evaporation.

J. Appl. Physiol. 1972. 33 (1) p. 99

- JACQUEMIN, Ch. - VARENE, P. - L'HUILLIER, J. -

Aspects respiratoires de l'environnement thermique hyperbare.

J. Physiol. (Paris) 1971 63 (3) 293-295.

- LANDAU, J.V. -

Hydrostatic effects on cellular function in Underwater physiology.

Edited by C.J. Lambertsen.

A.P. 1971 p. 85 à 93.

- LEFRANCOIS, R. - PASQUIS, P. - GAUTIER, H. - CEVAER, A.M. - LEROY, J.

Ventilation pulmonaire et coefficient d'extraction de l'oxygène de l'air chez l'homme à haute et basse altitude.

J. Physiol. (Paris) 1971, 63 (6) 135 A.

- LEVER, M.J. - MILLER, K.W. - PATON, W.D.M. - STREETT, W.B. - SMITH, E.B. -

Effects of hydrostatic pressure on mammals.

In Underwater Physiology

C.J. Lambertsen éd.

A.P. Publ. 1971 101-108.

- LEON, H.A. and COOK, S.F. -

A mechanism by which helium increases metabolism in small mammals.

Am. J. Physiol. 1960 199 (2) 243-245.

- L'HUILLIER, J. - VARENE, P. - JACQUEMIN, C. -

Echanges thermiques respiratoires en milieu hyperbare.

J. Int. Hyperbarie Marseille 1970.

- LIDDELL, F.D.K. -

Estimation of energy expenditure from expired air.

J. Appl. Physiol. 1963, 18, (1), 25-29.

- Mac ADAMS, W.H. -

Heat transmission.

3 rd Edition, Mc Graw-Hill, New-York, 1954.

- Mc CUTCHAN, J.W. - TAYLOR, C.L. -

Respiratory heat exchange with varying temperature and humidity of inspired Air.

J. Appl. Physiol. 1951, 4, 121-135.

- MATO, D.A. et NEVILLE, J.R. -

The effect of chemically inert gases on oxygen consumption in living tissue.

U.S.A.F. School of Aerospace Medicine

Report No SAM-TR-66-109

Brooks Air Force Base, Texas.

- MARGARIA, R. - MILIC-EMILI, G. - PETIT, J.M. - CAVAGNA, G. -

Mechanical work of breathing during muscular exercise.

J. Appl. Physiol. 1960, 15, 354-358.

- MARKHAM, A.E. and KOBE, K.A. -

Solubility of gases in liquids.

Chem. Rev. 1941 29 518-538.

- MASON, E. and SAXENA, S.C. -

Approximate formula for thermal conductivity of gas mixtures.

Physic fluids 1958 1 (5), 361-369.

- MILIC-EMILI, J. - PETIT, J. -

Mechanical efficiency of breathing.

J. Appl. Physiol. 1960, 15, 359.

- MINARD, D. -

Physiology in the space environment (Vol. II Respiration).

Nat. Acad. Sci. Nat. Res. Council.

Washington DC 87-90, 1967.

- MISSENARD, A. -

Mise au point sur les échanges thermiques entre le corps humain et l'ambiance.

Coefficient de charge thermique dans les ambiances chaudes.

Industries thermiques, 12, 1957, 735-752.

- MITCHELL, D. -

Human surface temperature : its measurement and its significance in thermoregulation.

Thesis Johannesburg 1972, p. 370.

- MITCHELL, D. - WYNDHAM, C.H. - ATKINS, A.R. - VERMELEN, A.J. - HOFMEYER, H.S. -
STRYDOM, N.B. - HODGSON, T. -

Direct measurement of the thermal responses of nude resting men in dry environments.

Arch. Ges. Physiol. 303 : 324-343, 1968.

- MITCHELL, D. - WYNDHAM, C.H. - VERMEULEN, A.S. - HODGSON, T. - ATKINS, A.R. -
HOFMEYER, H.S. -

Radiant and convective heat transfer of nude men in dry air.

J. Appl. Physiol. 1969, 26, 111-118.

- MURLIN, J.R. - BURTON, A.C. -
Human calorimetry. I. A semi-automatic respiration calorimeter.
J. Nutr. 9, 233-259, 1935.
- MURPHY, T.M. CLARK, W.H. BUCKINGHAM, I.P.B. - YOUNG, W.A. -
Respiratory gas exchange in exercise during helium oxygen breathing.
J. Appl. Physiol. 1969 26 (3) 303-307.
- NEVINS, R.G. - HOLM, F.W. - ADVANI, G.H. -
Heat loss analysis for Deep-Diving Oceanauts.
ASME Publication : Winter Annual Meeting. Chicago Nov. 1965, 11 p.
- OTIS, A.B. -
The work of breathing.
Physiol. Rev. 1954, 34, 449.
- OVERFIELD, E.M. - SALTZMAN, H.A. - KYLSTRA, B.A. - SALZANO, J.V. -
Respiratory gas exchange in normal men breathing 0,9 % oxygen in
helium at 31,3 Ata.
J. Appl. Physiol. 1969 27, (4), 471-475.
- PETIT, J.M. - DEROANNE, R. - TROQUET, J. - DAMOISEAU, J. - FRANCOIS, Y. -
Examen critique du rendement de l'activité ventilatoire. Influence
des méthodes de mesure du travail mécanique de la température de l'air
inspiré, de la pression partielle d'O₂ alvéolaire et du régime ven-
tilatoire.
ARBEIT Physiol. 1962, 19, 252-286.
- RAWLINS, J.S.P. - TAUBER, J.F. -
Thermal balance at depth.
in Underwater Physiology
C.J. LAMBERTSEN Edit. Acad. Press. N.Y. 1971 p. 435-442.
- RAYMOND, L.W. - BEEBE, W.H., BONDI, K.R. - LINDBERG, C.R. -
Body temperature and metabolism in hyperbaric helium atmospheres.
J. Appl. Physiol. 1968, 24, (5), 678-684.
- RHOADES, R.A. - WRIGHT, R.A. - HIATT, E.P. - WEISS, H.S. -
Metabolic and thermal responses of the rat to a helium oxygen environ-
ment.
Am. J. Physiol. 1967, 233, (4), p. 1009-1014.
- RODGERS, S.H. - FENN, W.O. - CRAIG, A.B. -
Fisic oxygen consumption in H₂, He or H₂ media.
Respiration Physiology 1969, 6, 170-177.
- ROTH, E.M. -
Inert gas.
in Compendium of human responses to the aerospace environment:
Vol. III Section 11 NASA CR 1205 november 1968.
- ROTH, E.M. -
Gas physiology in space operations.
The new England journal of medicine 1966, 21 july 144-154, 28 july
1966-203.

- SALTZMAN, H.A. - SALZANO, J.V. - BLENKARN, G.D. and KYLSTRA, J.A. -
Effects of pressure on ventilation and gas exchange in man.
J. Appl. Physiol. 1971, 30, (4), 443-449.
- SALZANO, J. - OVERFIELD, E.M., RAUSCH, D.C., SALTZMAN, H.A., KYLSTRA, J.A. -
KELLEY, J.S. - SUMMITT, J.K. -
Arterial blood gases, heat rate and gas exchanges during rest and
exercise in men saturated at a simulated, seawater depth of 1000 feet.
In Underwater Physiology
CJ LAMBERTSEN ed. A.P. Pub. 1971, 347-356.
- SCHAEFER, K.E. - CAREY, C.R. - DOUGHERTY, J.H. -
Pulmonary gas exchanges and urinary electrolytes excretion during satu-
ration excursion diving to pressure equivalent to 800 and 1000 feet
seawater.
Aerospace Med. 1970, 41, 856-864.
- SCHAEFER, K.E. - CAREY, C.R. - DOUGHERTY, J.H. -
Pulmonary function and respiratory gas exchanges during saturation.
Excursion diving to pressure.
Equivalent to 1000 feet of sea water.
in Underwater Physiology.
CJ LAMBERTSEN éd. A.P. Pub. 1971, 357-370.
- SNELLEN, J.W. -
Mean body temperature and the control of thermal sweating.
Acta Physiol. Pharmacol. Neerl. 14 99-174, 1966.
- SNELLEN, J.W. - MITCHELL, D. - WYNDHAM, C.H. -
Heat of evaporation of sweat.
J. Appl. Physiol. 29 40-44, 1970.
- SRIVASTAVA, B.N. and BARDA, A.K. -
Thermal conductivity of binary mixtures of diatomic and monoatomic
gases.
J. Chem. Physics 1960, 32, p. 427-435.
- STOLNIJK, JA.J. - HARDY, J.D. -
Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal
transients.
J. Appl. Physiol. 1969, 27, 726-730.
- TIMBAL, J. - COLIN, J. - BOUTELIER, C. -
Etude des échanges thermiques par convection en fonction de la pres-
sion barométrique.
Rev. Med. Aéro. 1970, 36, 183-186.
- TIMBAL, J. - COLIN, J. - BOUTELIER, C. -
Influence de l'altitude sur les échanges thermiques de l'homme.
Congrès de Méd. Aéron. Spat. Amsterdam 1969
in : Recent Advances in Aerospace Medicine 337-339.
De-Busby.

/...

- VARENE, P. -

La ventilation pulmonaire en plongée profonde.
Gazette Médicale de France - 1971, 78, (25), 4099-4106.

- VARENE, P. - JACQUEMIN, C. - L'HUILLIER, J. -

Déperdition de chaleur par convection respiratoire.
Application à l'environnement hyperbare.
J. Physiol. (Paris) 1970, 62, suppl. 2, 326-327.

- VARENE, P. - JACQUEMIN, C. - L'HUILLIER, J. -

Mécanique ventilatoire et pression barométrique.
Repos et exercice musculaire en altitude et en plongée.
Le poumon et le coeur 1971; XXVII, (3), 331-359.

- VARENE, P. - SAUMON, G. - VIEILLEFOND, H. et L'HUILLIER, J. -

Mécanique ventilatoire en plongée profonde : résultats de l'expérience
Physalie V.
Bull. Med. Subaquat. et hyperbare. 1971, 6, 9-16.

- VERON, M. -

Transmissions de la chaleur.
Cours de Thermique Industrielle à l'Ecole Centrale des Arts et Manu-
factures. 434 p. 1965.

- WEIL, L. -

Elements des échanges thermiques.
Paris : Gauthier-Villars, 225 p., 1965.

- WEBB, P. -

Body heat loss in under sea gaseous environment.
Aerospace Med. 1970, 41, (11), 1282-1288.

- WEBB, P. - ANNIS, J.F. -

Respiratory heat loss with high density gas mixtures.
Final Report on Contract n° 4965 (00)
Office of naval Research Washington DC 1966.

- WEISS, H.S. - WRIGHT, R.A. et HIATT, E.P. -

Embryo development and chick growth in a He O₂ Atmosphere.
Aerospace Medicine March 1965, 36, (3), p. 201-206.

- WOODLOCK, A.H. - PRATT, R.L. - BRECKENRIDGE, J.R. -

Man's thermal balance in warm environments.
U.S. Quartermaster Research and Development Center Technical
Rep. N° EP 30, 1956.