

Mécanique ventilatoire chez l'Homme à haute altitude,

par R. LEFRANÇOIS, H. GAUTIER et P. PASQUIS (*).

La ventilation pulmonaire des sujets nés à haute altitude est moins importante que celle des sujets originaires des plaines acclimatés à la même altitude, tant au repos qu'au cours de l'exercice musculaire. Cette différence a été expliquée par une moindre efficacité des stimulus ventilatoires des premiers (1, 2, 3). Cependant, cette différence de réponses à une même ambiance pourrait être, totalement ou en partie, liée à des modifications des propriétés mécaniques thoracopulmonaires chez les sujets nés en altitude, le système effecteur ventilatoire de ces derniers répondant différemment à une même sollicitation centrale. Des travaux concernant ce problème ont été effectués soit en altitude simulée, soit en altitude réelle, chez des sujets récemment acclimatés. Il a paru intéressant de comparer quelques données mécaniques ventilatoires classiques recueillies chez des natifs de régions élevées à celles obtenues chez des sujets acclimatés à la même altitude.

Méthodes. — 1. SUJETS. — Ce sont des adultes sédentaires répartis en 3 groupes : 18 natifs de La Paz, Bolivie, 3660 m ; 10 sujets originaires des plaines étudiés soit au niveau de la mer, soit après un séjour de 1 mois à La Paz.

(*) Avec la collaboration technique de M. J. F. Gibon.

(1) R. Lefrançois, H. Gautier et P. Pasquis, *Resp. Physiol.*, 1968, t. 4, p. 217.

(2) R. Lefrançois, H. Gautier, P. Pasquis et E. Vargas, *Fed. Proceed.*, 1969, t. 28, p. 1296.

(3) R. Lefrançois, H. Gautier, P. Pasquis et M. F. Monconduit, *J. de Physiol.*, 1969, t. 61, p. 335.

2. TECHNIQUES. — La pression transthoracopulmonaire prise entre la bouche et l'ambiance, la pression transpariétale obtenue entre la pression œsophagienne et l'ambiance et la pression transpulmonaire assimilée à la pression œsophagobuccale sont mesurées à l'aide d'électromanomètres différentiels. Le débit instantané est obtenu par pneumotachographie, les volumes pulmonaires par intégration électronique du signal précédent.

3. PROTOCOLE. — Les données spirométriques classiques : capacité vitale, volume expiré maximal par seconde (VEMS) et la ventilation maximale volontaire, sont mesurées. Les compliances thoracopulmonaire et pariétale sont déterminées en reportant sur un diagramme

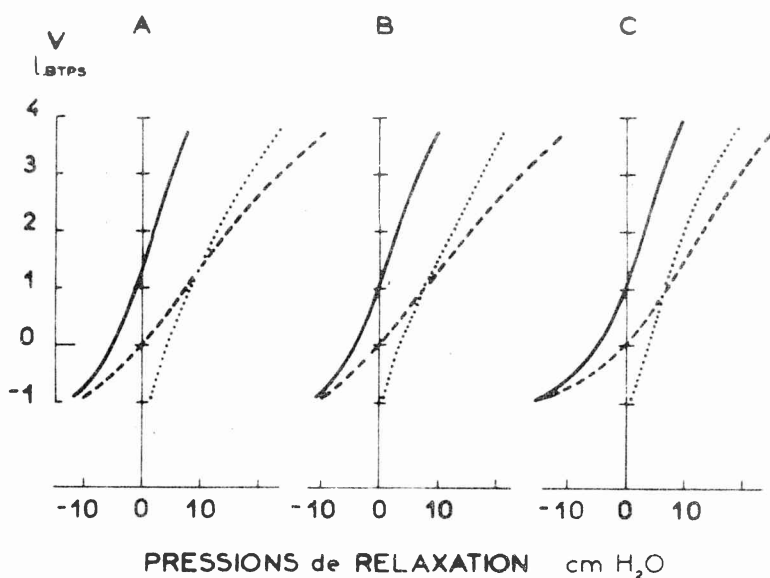


Fig. 1. — Courbes volume-pression transthoracopulmonaires (en tirets), transpariétales (trait plein) et pulmonaires (pointillés) obtenues, en A, à 25 m, chez des sujets originaires des plaines ; en B et C, à 3660 m, chez des sujets originaires de basse et haute altitude. Le zéro des volumes correspond au volume de fin d'expiration de repos. Les trois courbes sont superposables.

volume-pression les pressions correspondantes pour différents volumes obtenus par relaxation sur un manomètre, à différents niveaux de la capacité vitale ; la compliànce pulmonaire est déduite des précédentes. Au repos et au cours d'exercices musculaires de 60 et 120 watts, réalisés par la méthode du step-test, la compliànce pulmonaire, les résistances dynamiques ainsi que le travail ventilatoire sont déterminés. Enfin, le travail ventilatoire est mesuré lors d'épreuves de ventilation maximale volontaire, il est calculé sur plusieurs cycles et exprimé en litre.cmH₂O.mn⁻¹ (puissance ventilatoire).

Résultats. — 1. **SPIROMÉTRIE.** — A haute altitude, la capacité vitale et le VEMS, exprimés en comparaison des valeurs de la CECA (4), ne sont pas significativement modifiés ; le débit ventilatoire maximal de chaque sujet, quelle que soit son origine, est augmenté significativement ($p < 0,01$). Enfin, à un niveau donné, la ventilation maximale n'est pas significativement différente quelle que soit l'altitude d'origine du sujet (tableau I).

2. **PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES STATIQUES** (fig. 1). — Les 3 courbes construites à partir du diagramme volume-pression sont superposables chez les différents groupes de sujets. Les propriétés élastiques thoracopulmonaires des natifs altitudinaux sont donc comparables à celles des sujets nés au niveau de la mer.

3. **PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DYNAMIQUES.** — La compliance pulmonaire dynamique, exprimée en valeur absolue ou par rapport à la capacité vitale (compliance spécifique) et les résistances broncho-pul-

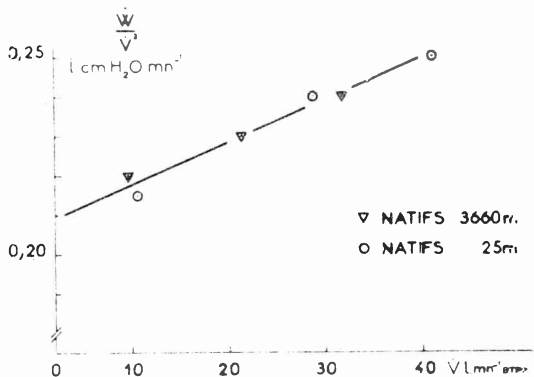


Fig. 2. — Corrélation entre le rapport puissance ventilatoire (\dot{W}) sur le carré de la ventilation (\dot{V}^2) en fonction de \dot{V} ($r = 0,99$).

monaires sont identiques chez les 3 groupes de sujets. Pour les 3 niveaux métaboliques étudiés : repos, exercices de 60 à 120 watts, la puissance ventilatoire développée par les natifs des Hauts Plateaux est moindre que celle des sujets originaires des plaines. Cependant, dans tous les cas, la puissance ventilatoire développée pour un débit donné est la même chez les 2 groupes de sujets à 3660 m (tableau II, fig. 2).

Discussion. — 1. **SPIROMÉTRIE.** — Les mesures de capacité vitale en altitude simulée (5, 6) montrent une diminution de 3 % à 5500 m et 7 % à 10200 m, avec une augmentation du VEMS de l'ordre de 5 à

(4) CECA, Aide-mémoire pour la pratique de l'examen de la fonction ventilatoire par spirométrie, Ed. Masson, Paris, 1961.

(5) H. Rahn et D. Hammond, *J. Appl. Physiol.*, 1952, t. 4, p. 715.

(6) F. Ulvedal, T. E. Morgan Jr., R. C. Cutler et B. E. Welch, *J. Appl. Physiol.*, 1963, t. 18, p. 904.

Altitude des mesures	3660 m		25 m
Altitude de naissance	basse	haute	basse
Nombre de sujets.....	10	18	4
Age (ans).....	28 ± 2	27 ± 2	31
Poids (kg).....	70 ± 2	67 ± 2	78 ± 1
Taille (cm).....	174 ± 1	168 ± 1	173 ± 1
CV (% CECA).....	97 ± 4	98 ± 2	99 ± 1
VEMS/CV (%).	71 ± 3	74 ± 2	73 ± 1
Compliance pulm. dyn. (ml. cmH ₂ O ⁻¹).....	206 ± 17	172 ± 11	221 ± 7
Compliance pulm. spéc. (ml. cmH ₂ O ⁻¹ .lcy ⁻¹).....	41 ± 2	38 ± 2,5	42 ± 1,4
Résistances dyn. insp. (cmH ₂ O/l. s ⁻¹).....	2 ± 0,2	2,7 ± 0,35	3,2 ± 0,2
Résistances dyn. exp. (cmH ₂ O/l. s ⁻¹).....	4 ± 0,7	3,5 ± 0,3	4,8 ± 0,4
Ventilation maximale			
l. mn ⁻¹ BTPS.....	151 ± 8	140 ± 10	129 ± 8
% théorique (15).....	122 ± 11	110 ± 10	97 ± 5
W l. cmH ₂ O.mn ⁻¹	18400 ± 2200	14500 ± 1300	18800 ± 4100
V̇ calculé d'après (14).....	145 ± 6	134 ± 4	132 ± 10
W/V ²	0,80 ± 0,07	0,74 ± 0,10	1,13 ± 0,15

Tableau I. — Données biométriques, spirométriques (meilleure performance) et mécaniques (moyenne de 5 cycles) recueillies au niveau de la mer et à 3660 m chez des sujets originaires de basse et haute altitude.

Altitude de naissance	Basse	Haute
Nombre de sujets	3	5
Repos		
V̇ l. mn ⁻¹ BTPS.....	10,6 ± 0,6	9,5 ± 0,2
W l. cmH ₂ O. mn ⁻¹	24 ± 3	20 ± 4
W/V ²	0,215 ± 0,05	0,22 ± 0,03
60 watts		
V̇ l. mn ⁻¹ BTPS.....	28,8 ± 2,8	21,4 ± 0,8
W l. cmH ₂ O. mn ⁻¹	163 ± 15	104 ± 12
W/V ²	0,24 ± 0,04	0,23 ± 0,02
120 watts		
V̇ l. mn ⁻¹ BTPS.....	41,1 ± 1,4	31,8 ± 3,6
W l. cmH ₂ O mn ⁻¹	425 ± 20	255 ± 50
W/V ²	0,25 ± 0,03	0,24 ± 0,06

Tableau II. — Débit ventilatoire V̇, puissance ventilatoire Ẇ et rapport Ẇ/V² à 3 niveaux métaboliques mesurés chez des sujets natifs de basse et haute altitude.

8 %. Ces variations ne sont pas corrigées par inhalation d'oxygène. En altitude réelle, chez des sujets séjournant à des altitudes de l'ordre de 4300 m, Rahn (5), Shields (7) et Tenney (8) observent les mêmes résultats qu'en altitude simulée ; mais après une semaine de séjour, ces modifications disparaissent. Les résultats rapportés dans ce travail ont été observés après un séjour d'un mois et sont donc conformes à ceux des auteurs précédents. Il n'a pas été noté de différences entre les sujets originaires d'altitudes différentes comme l'avait déjà montré Hurtado (9).

2. TRAVAIL VENTILATOIRE. — Otis (10) a établi que la puissance ventilatoire est liée au débit par la relation : $\dot{W} = b\dot{V}^2 + c\dot{V}^3$ [1] ; les paramètres b et c dépendent des propriétés mécaniques de l'appareil thoracopulmonaire et, en outre, b dépend de la viscosité et c de la masse volumique des gaz inhalés. Nous avons vu précédemment que les propriétés mécaniques du thorax sont comparables pour tous les groupes de sujets étudiés ; en conséquence, les modifications de valeur de b et c ne peuvent résulter que des modifications des propriétés physiques des gaz inhalés. Or, à 3660 m, les valeurs de la viscosité et de la masse volumique de l'air ne représentent respectivement que 98 et 63 pour cent de la valeur du niveau de la mer. A ce niveau (25 m), lors de l'inhalation d'O₂ pur, les valeurs de b et c calculées par Petit (11) sont de 210×10^{-3} et 160×10^{-5} . L'oxygène étant plus visqueux et plus dense que l'air, les coefficients b et c , lorsque le sujet respire de l'air ambiant, deviennent 217×10^{-3} et 145×10^{-5} respectivement. A 3660 m, l'équation [1] peut donc s'écrire :

$$\dot{W} = 213 \times 10^{-3} \dot{V}^2 + 90 \times 10^{-5} \dot{V}^3 \quad [2]$$

A partir des valeurs expérimentales calculées chez les deux groupes de sujets à 3660 m (tableau II), les paramètres de l'équation de régression liant \dot{W}/\dot{V}^2 et le débit ont été déterminés (fig. 2) et l'équation [1] s'écrit alors :

$$\dot{W} = 206 \times 10^{-3} \dot{V}^2 + 114 \pm 8 \times 10^{-5} \dot{V}^3 \quad [3]$$

Les valeurs de b et c de l'équation [3] ne sont pas significativement différentes des valeurs de l'équation [2], c'est-à-dire que les valeurs mesurées en altitude réelle sont comparatives à celles établies en altitude simulée. Par ailleurs, l'équation [3] a été établie en utilisant indifféremment les valeurs recueillies pour les sujets originaires de l'altitude et des plaines et le coefficient de corrélation obtenu ($r = 0,99$) confirme qu'il n'existe pas de différence entre les propriétés mécaniques thoracopulmonaires des 2 groupes de sujets.

(7) J. L. Shields, J. P. Hannon, C. W. Harris et W. S. Platner, *J. Appl. Physiol.*, 1968, t. 25, p. 606.

(8) S. M. Tenney, H. Rahn, R. C. Stroud et J. C. Mithoefer, *J. Appl. Physiol.*, 1952, t. 5, p. 607.

(9) A. Hurtado, *in Handbook of Physiology*, Section 4, p. 843.

(10) A. B. Otis, W. O. Fenn et H. Rahn, *J. Appl. Physiol.*, 1950, t. 2, p. 592.

(11) J. M. Petit, G. Milic-Emili et J. Troquet, *Rev. Med. Aeron.*, 1963, t. 7, p. 276.

3. VENTILATION MAXIMALE VOLONTAIRE. — Le débit ventilatoire maximal est augmenté en altitude (6, 7, 12). Or, d'après Slonim et Chapin (13), cette augmentation est inversement proportionnelle à la racine carrée de la pression barométrique ; c'est-à-dire qu'à 3660 m ($P_B = 490$ mmHg), le débit maximal devrait être 125 pour cent de la valeur mesurée au niveau de la mer. Les valeurs trouvées à 3660 m sont respectivement de 122 et 126 pour cent des valeurs observées au niveau de la mer chez les sujets altitudinaires et chez les autres. Ces résultats confirment les données de Slonim et Chapin et l'identité des propriétés mécaniques thoraciques des 2 groupes de sujets.

La puissance ventilatoire développée au cours de la ventilation maximale volontaire n'est pas modifiée par un séjour à l'altitude (tableau I). Les natifs de 3660 m sont plus petits que les autres sujets et de ce fait présentent une ventilation maximale moindre (140 l.mn^{-1} contre 151 l.mn^{-1}). Il en résulte que leur puissance ventilatoire est plus faible. Cependant, pour un débit ventilatoire donné, les puissances développées par les 2 groupes de sujets sont identiques (10, 14) (tableau I).

Conclusion. — Les propriétés mécaniques thoracopulmonaires sont identiques au niveau de la mer et à haute altitude quel que soit le lieu de naissance des sujets. La seule modification observée chez les 2 groupes de sujets est une augmentation de la ventilation maximale volontaire ; la puissance développée au cours de cette épreuve étant la même qu'au niveau de la mer, cette amélioration des performances est uniquement liée aux changements des propriétés physiques de l'air. Dans ces conditions, les différences de comportement ventilatoire observées chez les natifs de l'altitude ne sont pas le fait d'une altération de la fonction de transfert de l'effecteur ventilatoire mais d'un réglage différent du contrôle respiratoire.

(Laboratoire de Physiologie, Faculté de Médecine, Rouen).

(12) S. Miles, *J. of Physiol.*, 1957, t. 137, p. 85 P.

(13) N. B. Slonim et J. L. Chapin, in *Respiration Physiology*, Ed C. V. Mosby Company, 1967, p. 45.

(14) J. E. Cotes, *Proc. Roy. Soc.*, London, 1954, t. 143, p. 32.

(15) J. Germouty, Dans la *Fonction Respiratoire*, p. 207.