

COMMENT J'EXPLORE...

un dysfonctionnement des muscles respiratoires

C. LEHANCE (1), P. CLOSE (2), Th. BURY (3)

RÉSUMÉ : Comme pour les autres muscles squelettiques, la performance des muscles ventilatoires peut être évaluée. Les principaux tests permettant l'évaluation de la force des muscles respiratoires sont la mesure des pressions inspiratoire et expiratoire maximales (PI max, PE max), la mesure de la pression développée lors d'une manœuvre de reniflement forcée (SNIP) ou encore la mesure de la pression transdiaphragmatique. Ces mesures sont relativement simples, mais nécessitent une bonne collaboration du sujet testé. L'évaluation de l'endurance des muscles respiratoires se base essentiellement sur l'enregistrement de la ventilation maximale minute (VMM) ou sur une épreuve de charge inspiratoire incrémentielle.

Les muscles respiratoires sont des éléments essentiels du système thoraco-pulmonaire. Ils forment une pompe relativement complexe destinée à augmenter le volume de la cage thoracique et, finalement, à générer la ventilation alvéolaire. Longtemps négligée, l'étude des muscles respiratoires est actuellement en plein essor. Il est aujourd'hui bien démontré qu'une perte d'efficacité des muscles peut survenir chez des insuffisants respiratoires, liée soit à de mauvaises conditions mécaniques de fonctionnement, soit à une fatigue musculaire.

Après un bref rappel de l'anatomie et de la physiologie des muscles respiratoires, nous décrivons les principales modalités d'évaluation de la fonction musculaire respiratoire.

Un deuxième article sera consacré à l'étude de la physiopathologie des muscles respiratoires.

ANATOMIE DES MUSCLES RESPIRATOIRES

Le diaphragme et les autres muscles respiratoires sont des muscles squelettiques adaptés à la fonction ventilatoire. Ils diffèrent de la plupart de ces derniers par leur grande capacité oxydative, leur plus grande densité en capillaires, leur débit sanguin plus important, caractéristiques qui en font des muscles typiquement endurants. Ce sont les seuls muscles squelettiques qui se contractent rythmiquement durant toute la vie. Les muscles respiratoires, comme les autres muscles squelettiques, contiennent plusieurs types de fibres musculaires organisées en unités motrices innervées chacune par un motoneurone alpha. Nous ne revenons pas sur la structure et les propriétés contractiles des muscles respiratoires, mais on considère à l'heure actuelle, que

ASSESSMENT OF VENTILATORY MUSCLE PERFORMANCE

SUMMARY : As for other skeletal muscles, ventilatory muscle performance can be described in terms of strength and endurance. Ventilatory muscle strength is measured, for example, as the maximum inspiratory and expiratory mouth pressures. It is now a routine procedure in many pulmonary function laboratories. Measurements of ventilatory muscle endurance are more difficult but two general types of tests are used : maximum voluntary ventilation and inspiratory threshold loading.

KEYWORDS : *Respiratory muscles – Assessment – Strength*

la proportion en fibres lentes dans le diaphragme humain est plus élevée que dans les autres muscles squelettiques, ce qui fait du diaphragme un muscle particulièrement bien adapté aux contractions rythmiques et continues (1).

Le diaphragme

C'est le principal muscle respiratoire. Il intervient essentiellement lors de l'inspiration. Il sépare la cage thoracique de la cavité abdominale et est généralement décrit comme une fine lame musculo-tendineuse en forme de coupole à convexité supérieure qui s'insère surtout au pourtour de la partie inférieure de la cage thoracique. La plupart des fibres musculaires sont orientées dans le sens crânio-caudal. Seules les extrémités des fibres s'insérant sur la portion tendineuse s'incurvent vers les viscères abdominaux, et suivent donc une direction plus horizontale.

De façon schématique, la contraction du diaphragme lors de l'inspiration a plusieurs effets : augmentation du diamètre crânio-caudal de la cage thoracique, mais aussi augmentation du diamètre antéro-postérieur et transverse du tiers inférieur de cette cage thoracique.

L'innervation motrice et sensitive du diaphragme est assurée par les nerfs phréniques qui prennent leur origine entre la 3^{ème} et la 5^{ème} vertèbre cervicale. Toutefois, la partie inférieure du diaphragme est innervée par les 6 ou 7 derniers nerfs intercostaux. Quant à la vascularisation du diaphragme, elle est riche et se fait essentiellement par les artères phréniques internes, mais également par des branches des artères intercostales et de l'artère mammaire interne (2).

Autres muscles inspiratoires

La ventilation, même calme, requiert une contraction simultanée et coordonnée du diaphragme, des intercostaux et des scalènes.

D'autres muscles ne sont pas actifs durant la ventilation spontanée et sont nommés "acces-

(1) Assistant, (2) Assistant volontaire, (3) Chargé de Cours, Secteur Physiologie humaine et de l'effort physique, ULg.

soires". Ils peuvent être recrutés en cas de besoin. Parmi ces muscles, nous pouvons citer certains groupes de muscles intercostaux, les muscles sterno-cléido-mastoïdiens.

Cet ensemble de muscles inspiratoires autres que le diaphragme joue un rôle particulièrement important en cas de ventilation forcée ou lorsqu'il existe un dysfonctionnement du diaphragme.

Les muscles abdominaux

Ils ont tous une activité expiratoire. Bien qu'ils ne soient pas actifs au repos, ils sont recrutés en cas d'augmentation de la demande ventilatoire ou de la charge imposée à la pompe respiratoire. Parmi ces muscles abdominaux, citons en particulier les muscles grand droit, les obliques internes et externes, les transverses. Lorsque ces muscles se contractent, la pression abdominale augmente, refoulant ainsi le diaphragme vers le haut. C'est également ce qui se passe au cours des efforts de toux, de vomissement et de défécation.

PHYSIOLOGIE DES MUSCLES RESPIRATOIRES

Chez le sujet sain respirant calmement, seuls les muscles inspiratoires se contractent, le diaphragme contribuant de façon plus importante que les muscles de la cage thoracique aux mouvements de cette dernière. En position couchée, la contribution du diaphragme est encore majorée. L'inspiration est donc liée à la contraction du diaphragme et éventuellement des muscles intercostaux externes. L'expiration normale est foncièrement passive; elle résulte des forces élastiques de rappel du poumon. Lors de la respiration calme, le diaphragme s'aplatit donc en se contractant, augmentant ainsi le volume de la cage thoracique. La pression pleurale s'abaisse et le volume pulmonaire augmente en liaison avec la cage thoracique par l'intermédiaire de la plèvre. C'est en effet par l'intermédiaire du double feuillet pleural reliant thorax et poumon, que les muscles inspiratoires assurent la ventilation pulmonaire. L'augmentation de volume intrapulmonaire entraîne une diminution de la pression à l'intérieur du volume alvéolaire. La pression alvéolaire devient inférieure à la pression à la bouche : il se crée un débit de la bouche vers l'alvéole jusqu'à l'égalisation des pressions entre la bouche et les alvéoles en fin d'inspiration, c'est-à-dire en fin de contraction du diaphragme. A ce moment, le diaphragme se relâche passivement, avec les forces de rétraction du poumon et entraîne une augmentation de

la pression intra-alvéolaire qui devient supérieure à la pression atmosphérique. Il se crée un débit expiratoire jusqu'à l'égalisation des pressions en fin d'expiration passive, au point d'équilibre des forces élastiques qui s'exercent entre la paroi, diaphragme inclus, et le poumon, c'est-à-dire à la CRF.

Les autres muscles inspiratoires, dits muscles accessoires, n'interviennent qu'à l'inspiration forcée ou au cours de l'exercice (sterno-cléido-mastoïdien). Les muscles expiratoires (intercostaux internes) n'interviennent que lors d'expiration forcée ou à l'exercice. De fait, la transition du repos à l'exercice est associée à une modification brutale du recrutement des muscles respiratoires. En effet, lors d'un effort physique, la contribution des muscles inspiratoires de la cage thoracique prédomine sur celle du diaphragme et les muscles abdominaux sont recrutés dès l'initiation de l'effort. Cela permet d'augmenter le volume de fin d'inspiration aux dépens de la cage thoracique, et de diminuer le volume de fin d'expiration aux dépens de l'étage abdominal (3). Insistons sur le fait que dans tous les cas, c'est la différence de pression entre la bouche et l'alvéole qui crée un débit ventilatoire et non pas les variations de volume en tant que telles.

EVALUATION CLINIQUE DE LA FONCTION MUSCULAIRE RESPIRATOIRE

La performance des muscles respiratoires est diminuée en cas de dysfonctions diverses qui peuvent trouver leur origine dans la commande motrice, les muscles eux-mêmes ou dans une modification de leur configuration. Par ailleurs, la fatigue des muscles respiratoires se manifeste par une détérioration progressive de leurs performances au cours d'un effort soutenu au-dessus d'un certain seuil de tension et de temps de contraction.

Ainsi, l'exploration des muscles respiratoires se révèle utile dans de multiples situations faisant suspecter une dysfonction de ces muscles et en particulier du diaphragme :

- bronchopneumopathie chronique obstructive : dénutrition, corticothérapie prolongée, discordance entre la dyspnée et les valeurs spirométriques;
- maladies neuromusculaires : myopathie (y compris secondaire à la corticothérapie), myasthénie, sclérose latérale amyotrophique, ...
- pathologies systémiques : dermato-polymyosite, lupus, endocrinopathie, ...;
- paralysie phrénique uni- ou bilatérale (traumatique, post-CEC, idiopathique);

- pathologies restrictives d'origine inexpliquée;
- ...

Sur le plan de la physiologie, l'évaluation d'un muscle strié repose sur l'électromyographie et sur la mesure de trois variables principales : force, longueur et vitesse. Ce type d'évaluation des muscles respiratoires reste peu applicable en pratique clinique courante, car il nécessite des mesures invasives et complexes. En clinique, la fonction des muscles respiratoires est essentiellement évaluée par la mesure de leur force maximale et par les modifications du signal électromyographique (EMG).

I. EVALUATION DE LA FORCE DES MUSCLES RESPIRATOIRES

PI max et PE max

La force maximale des muscles respiratoires est évaluée par la mesure de la pression à la bouche lors d'un effort inspiratoire ou expiratoire maximal contre une occlusion. Un orifice de 1 à 2 mm est laissé ouvert afin d'éviter une fermeture de la glotte et une participation des muscles faciaux. Les pressions maximales varient selon le volume pulmonaire auquel les mesures sont réalisées : ainsi, lorsque le volume pulmonaire augmente du volume résiduel (VR) à la capacité pulmonaire totale (CPT), la pression inspiratoire maximale (PI max) diminue alors que la pression expiratoire maximale (PE max) augmente. Cela est dû au fait que la relation tension-longueur est optimale à VR pour les muscles inspiratoires et à CPT pour les muscles expiratoires. Dans un souci de standardisation, les mesures de PI max et PE max se réalisent au niveau de la CRF. Les valeurs normales moyennes fournies par la littérature sont présentées dans le tableau I (4). On considère habituellement qu'une PI max supérieure à 90 cmH₂O chez l'homme et à 70 cmH₂O chez la femme permet d'exclure une anomalie significative des muscles inspiratoires. En pratique, la mesure de PI max et PE max est réalisée, chez un sujet en position assise, à l'aide d'un manomètre électronique portable ou intégré à un spiromètre. Il s'agit d'une mesure simple, accessible et assez reproductible. Cependant, ces mesures sont dépendantes de la coopération du sujet et les

TABLEAU I. VALEURS THÉORIQUES DE LA PI MAX ET DE LA PE MAX (CMH₂O, M ± E.T)

Age	PI max		PE max	
	Homme	Femme	Homme	Femme
20 – 54	124 ± 36	87 ± 26	233 ± 69	152 ± 44
55 – 64	103 ± 26	77 ± 26	215 ± 63	145 ± 35
65 – 74	100 ± 26	70 ± 21	195 ± 63	130 ± 35

valeurs théoriques sont assez variables; il s'agit par ailleurs d'une mesure globale de la force musculaire (compensation possible par les muscles accessoires).

Sniff Nasal Inspiratory Pressure (SNIP)

Alternativement, la pression développée lors d'une manœuvre de reniflement forcée peut être enregistrée au niveau d'une narine. Il s'agit de la SNIP, décrite par les anglo-saxons. Cette mesure est une alternative séduisante à celle de la PI max, la manœuvre étant exécutée plus naturellement par une majorité des patients. Cependant, elle est aussi plus courte et dynamique, et les pressions peuvent alors être sous-estimées chez les patients présentant une résistance des voies aériennes élevée. En effet, la manœuvre est, dans ce cas, trop courte pour que les pressions s'équilibrent à l'intérieur du système respiratoire. Le tableau II présente les valeurs théoriques du SNIP (cmH₂O), mesurées en position assise (5). On considère habituellement qu'une SNIP supérieure à 90 cmH₂O chez l'homme et à 75 cmH₂O chez la femme permet d'exclure une faiblesse significative de la musculature inspiratoire.

TABLEAU II. VALEURS THÉORIQUES DU SNIP (CMH₂O, M ± E.T)

Age	SNIP	
	Homme	Femme
20 – 35	117 ± 48	84 ± 23
36 – 50	105 ± 39	94 ± 34
51 – 65	111 ± 25	83 ± 30
66 – 80	91 ± 34	75 ± 18

Pression trans-diaphragmatique

Alors que la PI max et la SNIP reflètent la force de l'ensemble des muscles inspiratoires, la force du diaphragme seule peut être évaluée par la mesure de la pression trans-diaphragmatique maximale (Pdi max), calculée selon :

$$Pdi = Pab - Ppl$$

où Pab est la pression abdominale mesurée par un ballonnet gastrique et

Ppl est la pression pleurale mesurée par un ballonnet œsophagien.

La Pdi max est obtenue en faisant effectuer simultanément un effort inspiratoire maximal et un effort expulsif abdominal maximal. Les valeurs normales moyennes de Pdi max se situent à 180-200 cmH₂O (6). Même si cette mesure de Pdi nécessite la mise en place d'une sonde à ballonnet œsophagien et gastrique, elle est relativement simple à réaliser mais présente l'inconvénient de nécessiter une excellente collaboration du sujet testé. Cela rend souvent difficile l'interprétation d'un résultat inférieur aux

normes, celui-ci pouvant être lié à un effort sous-maximal. Il convient donc de répéter les mesures et de les analyser de façon critique lorsque l'on souhaite déterminer des pressions maximales (7).

Stimulation phrénique

A l'opposé des précédentes, qui nécessitent une excellente collaboration du sujet testé, les techniques permettant d'évaluer la fonction du diaphragme par stimulation non invasive du nerf phrénique, grâce à un stimulus électrique ou, mieux, magnétique, sont indépendantes de la collaboration du sujet. Ces méthodes ne font cependant pas partie des tests réalisés quotidiennement, en routine clinique.

Sur le plan pratique, la stimulation phrénique électrique se réalise au niveau du cou à l'aide d'électrodes de surface avec recueil de l'EMG diaphragmatique (électrodes de surface positionnées généralement au 7^{ème} espace intercostal, près des jonctions chondro-costales). Quant à la stimulation phrénique magnétique, elle consiste à stimuler des racines phréniques par un champ magnétique intense créé à l'aide d'une bobine placée en cervical postérieur (C7).

2. EVALUATION DE LA FATIGUE DES MUSCLES RESPIRATOIRES

Dans certaines situations soumettant les muscles respiratoires à une charge élevée (sevrage de ventilation assistée, exercices, ...), il est utile de rechercher des signes de fatigue musculaire définie par l'incapacité du muscle à générer la contraction demandée. Plusieurs méthodes, dont la quantification reste difficile, sont utilisables mais ne sont interprétables actuellement que sur un mode comparatif :

- force musculaire (volontaire ou après stimulation) : elle diminue en cas de fatigue;
- l'électromyogramme (EMG) : la fatigue diaphragmatique s'accompagne précocement de modifications du spectre EMG au profit des basses fréquences;
- vitesse de relaxation musculaire : la fatigue se traduit par une diminution de la vitesse de relaxation du muscle, évaluée indirectement sur les courbes de pression obtenues lors d'un SNIP test ou sous stimulation.

Les deux dernières méthodes restent encore actuellement du domaine de la recherche physiopathologique.

Quant à l'EMG du diaphragme, il s'agit d'une technique peu spécifique, car le recueil de l'activité électrique du diaphragme peut être contaminé par l'activité des muscles intercostaux

internes et abdominaux, situés entre le diaphragme et les électrodes. L'EMG du diaphragme peut également être enregistré à l'aide d'une électrode œsophagienne : celle-ci permet d'enregistrer spécifiquement le diaphragme dans sa portion crurale.

L'enregistrement spécifique des autres muscles respiratoires par électrodes de surface est problématique en raison des interférences potentielles des muscles adjacents. L'emploi d'électrodes implantées, méthode bien sûr "invasive" et plus désagréable, permet au contraire d'obtenir un signal sélectif d'un seul muscle.

3. EVALUATION DE L'ENDURANCE DES MUSCLES INSPIRATOIRES

Nous pouvons également évaluer de manière indirecte la fatigabilité des muscles inspiratoires en testant leur endurance. Cette évaluation est utile dans certaines myopathies altérant plus précocement ce paramètre que la force musculaire (myopathie cortisonique, mitochondriale, ...).

La ventilation maximale minute (VMM) est l'épreuve d'endurance la plus simple, réalisable en routine à l'aide d'un spiromètre. Elle n'est interprétable en terme d'endurance musculaire qu'en l'absence de troubles ventilatoires significatifs.

Le test spécifique le plus utilisé est l'épreuve de charge inspiratoire incrémentielle consistant à connecter le patient sur une valve à seuil de déclenchement inspiratoire réglable, en débutant par une pression entre 20 et 30 % de la PI max (8). Par palier de 2 min., la résistance à l'inspiration est augmentée. Ainsi, avec l'augmentation de la charge, nous observons progressivement une diminution de la ventilation minute et du temps inspiratoire, de même qu'une augmentation de la consommation d'O₂ et de la PET CO₂. Le test nécessite 10 à 20 min. pour être complet et les réponses du sujet à l'augmentation de charge sont ainsi mesurées sur une gamme étendue de résistance (charge) à l'inspiration.

4. DÉMARCHE DIAGNOSTIQUE DEVANT UNE DYSFONCTION MUSCULAIRE INSPIRATOIRE

Les données de l'anamnèse, de l'examen clinique, de la spirométrie et de la radiographie thoracique peuvent évoquer une dysfonction musculaire inspiratoire. Ainsi, en cas de paralysie phrénique unilatérale, nous pouvons observer une position haute d'un hémidiaphragme voire une ascension paradoxale de cet hémidiaphragme lors d'un renflement maximal. Il est

également évident qu'une altération de la force des muscles respiratoires se traduit indirectement par une diminution de la capacité vitale, du volume de réserve expiratoire et de la capacité pulmonaire totale alors que le volume résiduel reste préservé. Quoi qu'il en soit, la diminution des volumes pulmonaires n'est ni sensible, ni spécifique et justifie donc, au moindre doute, le recours à des explorations plus spécifiques de la fonction musculaire. Il est classique de commencer l'exploration d'une dysfonction musculaire inspiratoire par la mesure de la PI max. Il s'agit en effet d'une technique volontaire, non invasive de dépistage. Si cette mesure de la PI max se révèle normale, ce test exclut une faiblesse inspiratoire globale cliniquement significative.

Par contre, si cette mesure de PI max est diminuée, l'exploration doit être poussée plus avant et généralement, outre le SNIP, la mesure de la pression trans-diaphragmatique devrait être réalisée : il s'agit donc là d'une technique volontaire dite invasive.

Si ces deux examens complémentaires se révèlent normaux, l'exploration peut être arrêtée et la fonction musculaire respiratoire considérée comme étant correcte.

Par contre, si la valeur de la pression trans-diaphragmatique est diminuée, cela évoque soit une faiblesse inspiratoire globale, soit une lésion du nerf phrénique, soit une myopathie.

Pour faire la part des choses, l'EMG du diaphragme avec mesure de la latence phrénique et analyse du tracé EMG devra être réalisé.

RÉFÉRENCES

1. Préfaut Chr.— Les muscles respiratoires, in Souramps medical Ed., *L'essentiel en physiologie respiratoire*, 1993, 48-45.
2. Edward R, Faulkner J.— Structure and function of the respiratory muscles, in Roussos C Ed., *The Thorax*, 2nd Ed. Marcel Dekker Inc. New York. 1995, 185-217.
3. Aliverti A, Cala S, Ferrigno G, et al.— Human respiratory muscle actions and control during exercise. *J Appl Physiol*, 1997, **83**, 1256-1269.
4. Black L, Hyatt R.— Maximal respiratory pressures : normal values and relationship to age and sex. *Am Rev Respir Dis*, 1969, **99**, 696-702.
5. Fitting J, Héritier F, Uldry C.— Evaluation de la force musculaire inspiratoire par la pression nasale lors du sniff. *Rev Mal Respir*, 1996, **13**, 479-484.
6. Laporta D, Grassino A.— Assessment of transdiaphragmatic pressure in humans. *J Appl Physiol*, 1985, **58**, 1469-1476.
7. Fitting J, Grassino A.— Exploration de la mobilité thoraco-abdominale et de la fonction des muscles respiratoires. *Rev Mal Resp*, 1986, **3**, 421-424.
8. Martyn J, Moreno R, Paré P, Pardy R.— Measurement of inspiratory muscle performance with incremental threshold loading. *Am Rev Respir Dis*, 1987, **135**, 918-923.

Les demandes de tirés à part sont à adresser au Pr Th. Bury, Service de Pneumologie, CHU Sart Tilman, 4000 Liège.