

Quelles explorations spécialisées pour les muscles respiratoires : de la stimulation magnétique à l'imagerie

E. Vérin

Au-delà des explorations « de première ligne » décrite dans ce cahier par le chapitre de T. Perez [1], de nombreuses méthodes ont été utilisées pour explorer le diaphragme, muscle inspiratoire « vital » chez l'homme. Les plus anciennes utilisaient l'imagerie, mais depuis les années 1960 se sont aussi développées des techniques neurophysiologiques. Imagerie et exploration neurophysiologique se sont depuis constamment améliorées, les unes et les autres augmentant considérablement les informations données par les explorations, d'une part sur la qualité des images et d'autre part sur les type de pathologies diagnostiquées. Néanmoins, même si les progrès en radiologie sont constants, seule l'exploration neuromusculaire du diaphragme, alliant enregistrement de pression et signal électromyographique permet de porter précisément le diagnostic de pathologie diaphragmatique.

Les apports de l'imagerie dans l'exploration du diaphragme

La radiographie de thorax peut faire suspecter une anomalie à partir d'une asymétrie de position des coupoles, mais elle ne permet ni d'affirmer un diagnostic ni d'évaluer une fonction. En effet, il existe de très nombreuses causes de « surélévation » d'un hémidiaphragme (anomalies pleurales, troubles de ventilation, embolie pulmonaire). Ceci s'applique également à l'observation de la mobilité des coupoles en scolie, que ce soit lors de la respiration calme ou lors d'un effort de reniflement maximal (*sniff-test*) [2]. De plus, certains sujets n'utilisent pas leur diaphragme lors du *sniff-test* [3]. Néanmoins, la constatation de mouvements opposés des hémicoupoles peut faire évoquer une hémiparalysie diaphragmatique, mais là encore, de faux positifs sont possibles. L'échographie n'est pas plus validée que la radiographie simple ou que la radioscopie, présente les mêmes limites, et est opérateur-dépendante. Il est pos-



Service de physiologie digestive, urinaire, respiratoire et sportive
CHU, Rouen, France.

Correspondance : E. Vérin, Service de physiologie digestive, urinaire, respiratoire et sportive
CHU de Rouen, 1 rue de Germont, 76031 Rouen Cedex.
eric.verin@chu-rouen.fr

sible de reconstruire le diaphragme en deux ou trois dimensions à partir d'acquisitions scanographiques [4] (fig. 1) ou par imagerie en résonance magnétique [5]. Ces méthodes permettent une compréhension de la physiologie du diaphragme et de la physiopathologie du retentissement sur sa fonction, par exemple des bronchopneumopathies chroniques obstructives (BPCO) [4], mais elles n'ont pas actuellement de place définie dans l'exploration des patients.

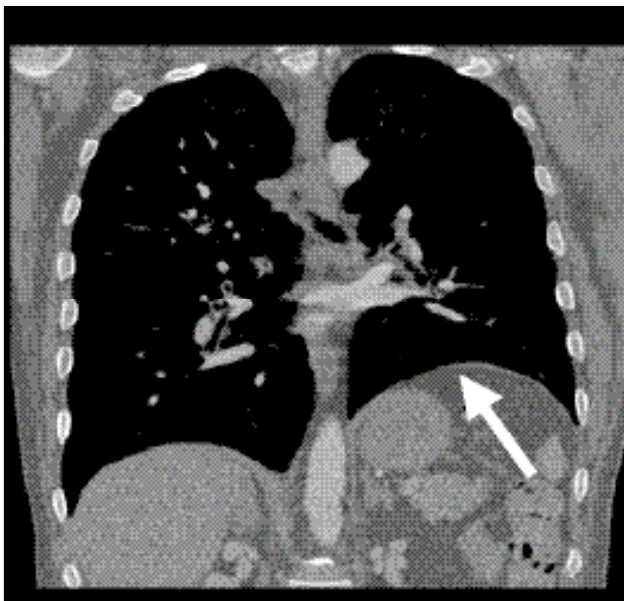


Fig. 1. Coupe frontale scanographique mettant en évidence une surélévation de la coupole diaphragmatique gauche. Cette coupole est visible sous la forme d'un liseré homogène, et paraît intègre (marqué par une flèche) (Dr A. Genevois, radiologie, CHU de Rouen).

Exploration neuromusculaire du diaphragme

Cette exploration est actuellement l'examen de référence dans l'exploration du diaphragme, et allie l'exploration neurophysiologique et l'enregistrement des pressions inspiratoires (voir revue dans [6]).

Electromyographie de surface

En plaçant deux électrodes sur la peau à la surface du thorax, en regard de la zone d'apposition du diaphragme, il est possible d'enregistrer une activité électrique du diaphragme [7]. L'électrode dite active est fixée dans un espace intercostal, et l'autre, dite neutre, sur un repère osseux. Néanmoins, cet enregistrement est qualitativement pauvre car enregistrant l'activité électrique d'autres muscles de la cage thoracique, en par-

ticulier les intercostaux. L'utilisation de sonde œsophagienne est une seconde possibilité. Elle comprend plusieurs paires d'électrodes, et est positionnée par voie nasale, dans l'œsophage, en regard du diaphragme [8]. Le signal recueilli est de bonne qualité et spécifique, mais son coût élevé et la nécessité d'utiliser des électrodes à usage unique limite son emploi. Néanmoins, le recueil de surface est moins problématique en réponse à une stimulation qu'en activité spontanée, car lors de la stimulation phrénique, il n'est anatomiquement pas possible de stimuler les muscles intercostaux.

Stimulation phrénique électrique au cou

Chaque nerf phrénique assure l'innervation de chaque héli-diaphragme. Sa stimulation à une intensité suffisante provoque une contraction simultanée des fibres musculaires diaphragmatiques homolatérales [9].

La stimulation électrique est la technique la plus ancienne [7, 10], et est réalisée à l'aide d'un stimulateur bipolaire ou monopolaire que l'on peut déplacer pour localiser le nerf phrénique au niveau du cou. L'avantage majeur de la stimulation électrique est de provoquer une contraction isolée du diaphragme. Elle connaît cependant des inconvénients et des limites. La localisation du nerf au cou est difficile car le nerf phrénique est petit, souvent incomplètement formé et constitué de nombreux filets nerveux [11]. Il existe de nombreuses variantes anatomiques [11] et, la stimulation électrique ne peut accéder au nerf phrénique accessoire qui rejoint le tronc du nerf phrénique dans le thorax [11]. Ces arguments limitent l'intérêt de cette technique d'autant plus que ses résultats sont très liés à l'entraînement de l'opérateur, et donc que l'on ne peut pas être sûr qu'une absence de réponse correspond effectivement à une lésion nerveuse. En plus, il est nécessaire de stimuler les deux nerfs phréniques simultanément pour interpréter la réponse mécanique du diaphragme ce qui rend la stimulation électrique au cou impraticable en exploration fonctionnelle diaphragmatique.

Stimulation magnétique

La stimulation magnétique cervicale des nerfs phréniques a été développée pour pallier les inconvénients de la stimulation électrique du phrénique au cou [12]. Elle dérive de techniques mises au point pour l'exploration fonctionnelle neurophysiologique, et repose sur le principe qu'un champ magnétique pulsé, produit par la décharge d'un courant de forte intensité dans une bobine de fil métallique, traverse les barrières osseuse et cutanée. À son tour, ce champ magnétique produit, des courants électriques secondaires de très faible intensité et peuvent dépolari- ser les structures nerveuses. Ainsi, il est possible de stimuler sans douleur ni effets secondaires des structures nerveuses profondes, centrales corticales ou périphériques. Pour l'exploration diaphragmatique en routine, un type de

bobine est principalement utilisé : bobine circulaire simple de 90 mm de diamètre, pour la stimulation magnétique cervicale non focale ou corticale (*fig. 2*). La stimulation magnétique est contre-indiquée en cas de port de stimulateurs implantés, cardiaques ou autres, et plus généralement en présence d'implants métalliques quelconques. La présence de dilatateurs coronariens (« stents ») n'est pas une contre-indication (dans la mesure où les patients porteurs de ce type de dispositif sont couramment examinés en imagerie par résonance magnétique).

Stimulation magnétique cervicale

La stimulation magnétique cervicale (SMC) (*fig. 2*) a été la première décrite. Avec cette technique, une bobine circulaire de 90 mm de diamètre est positionnée au niveau de la nuque, en regard de la septième ou de la huitième vertèbre cervicale et le nerf phrénique est stimulé à la partie supérieure

intra thoracique de son trajet [13], au-delà de l'anastomose avec le nerf phrénique accessoire. Par rapport à la stimulation électrique au cou, la stimulation magnétique cervicale lève le problème de la tolérance, celui de l'accessibilité du nerf phrénique accessoire, et celui de la difficulté technique. Du fait de son caractère non focal, de nombreux autres muscles de la cage thoracique se contractent simultanément. La disposition des électrodes est standardisée et a été validée en comparant chez des sujets sains différentes positions des électrodes de surface avec des électrodes aiguilles placées dans le diaphragme [14]. Les électrodes doivent être placées entre les 7^{ème} et 8^{ème} espaces intercostaux, sur la ligne médio claviculaire, à 2 cm de distance l'une de l'autre (*fig. 3*). La transformation de la force diaphragmatique en pression négative intrathoracique, lors de la stimulation magnétique cervicale, est meilleure que lors de la stimulation phrénique électrique bilatérale [15] car la stimulation magnétique cervicale a l'avantage de produire une

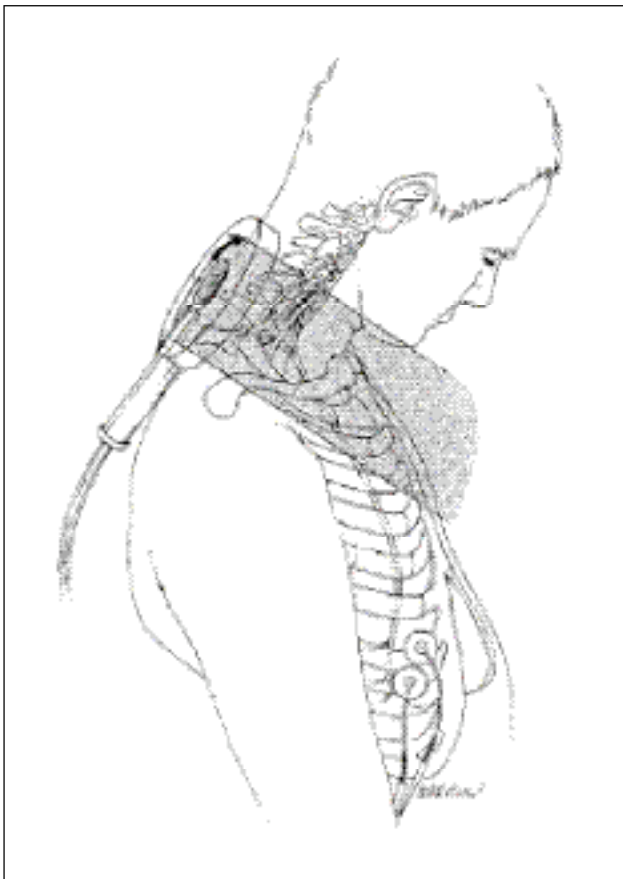


Fig. 2. Principe de la stimulation magnétique cervicale : la bobine ronde de 90 mm est placée en regard de C7, le champ magnétique créé est en grisé et vient dépolariiser les deux nerfs phréniques dans le thorax.

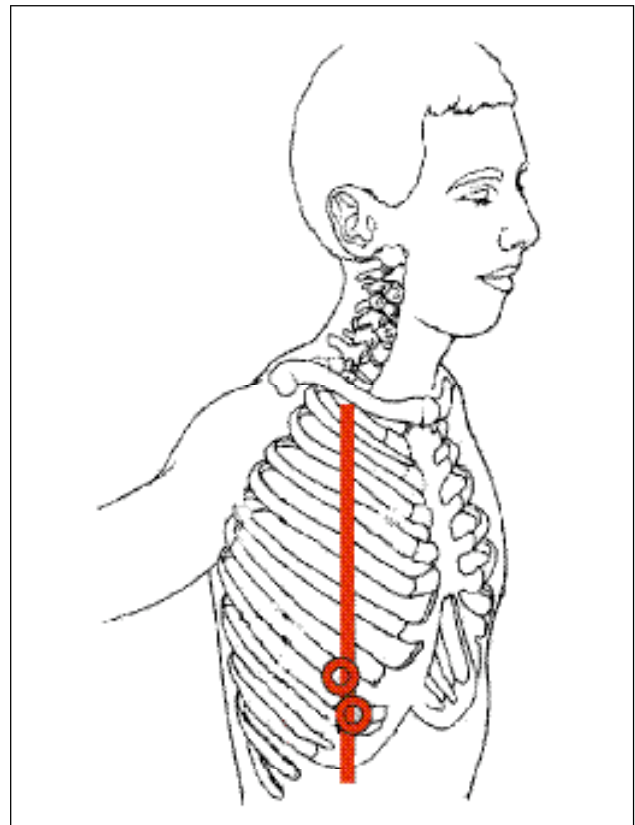


Fig. 3. Positionnement des électrodes de surface pour enregistrer une activité électrique diaphragmatique spécifique (marquée en rouge), placées entre les 7^{ème} et 8^{ème} espaces intercostaux, sur la ligne médio claviculaire (marquée d'un trait rouge). Une électrode est placée sur une côte, et une électrode au niveau de l'espace intercostal.

contraction diaphragmatique dans des conditions plus physiologiques que la stimulation électrique bilatérale. En effet, la SMC induit une co-contraction du diaphragme et des muscles qui, innervés par le nerf spinal et les racines cervicales, stabilisent la cage thoracique et réduisent les phénomènes de distorsion caractéristiques de la contraction diaphragmatique pure.

Réponse électrique à la stimulation magnétique cervicale

D'une façon générale, il est préférable d'étudier la conduction nerveuse au moyen d'électrodes de surface (l'enregistrement à l'aiguille donne des informations parcellaires par le faible nombre d'unités motrices étudiées ; de plus, il s'agit d'une technique agressive qui n'est pas complètement dénuée de risques). La stimulation phrénique entraîne une réponse motrice diaphragmatique. L'amplitude de cette réponse n'est pas codifiée, du fait d'une faible reproductibilité d'un patient à l'autre, et d'un jour à l'autre chez un même patient. Contrairement à ce qui est le cas pour les muscles habituellement étudiés en électromyographie, il n'est donc pas possible de donner une valeur normale raisonnable pour l'amplitude de la réponse motrice à la stimulation phrénique. Chez un patient donné, si les conditions de recueil du signal sont convenables, les amplitudes doivent être grossièrement symétriques. Les latences sont plus courtes en stimulation magnétique qu'électrique, des chiffres compris entre 5,5 et 6,5 ms correspondant à la fourchette normale (*fig. 4*) (en notant

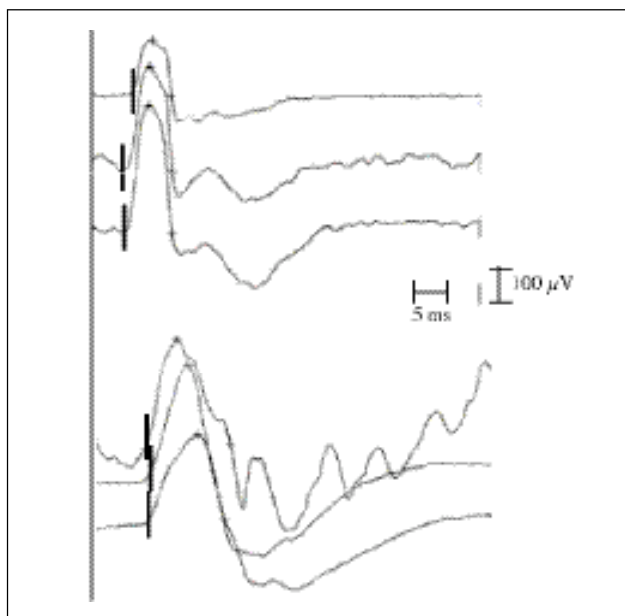


Fig. 4.

Réponse électromyographique de l'hémidiaphragme droit (haut) et gauche (bas) en réponse à trois stimulations magnétiques cervicales consécutives. L'artéfact de stimulation est marqué par une barre continue noire, les temps de latence cervico-diaphragmatique par un trait.

qu'une valeur inférieure à 5 ms doit faire suspecter une contamination du signal diaphragmatique par la réponse d'autres muscles [14]). La mesure de la conduction phrénique est importante dans toutes les suspicions de dysfonction diaphragmatique neurogène, qu'il s'agisse d'atteintes phréniques isolées (par exemple paralysie phrénique unilatérale suspectée sur une surélévation de coupole constatée radiologiquement) ou d'atteintes phréniques s'intégrant dans le cadre d'affections plus générales. Elle permet le diagnostic, mais également le suivi évolutif des patients. À cet égard, il convient de noter que la stimulation phrénique ne permet pas le diagnostic d'atteinte axonale, sauf en cas d'atteinte unilatérale par le biais de la comparaison des amplitudes à droite et à gauche. Un allongement de la latence de la réponse électrique s'observe en cas de pathologie des fibres myéliniques, et au cours des atrophies de dénervation profondes.

Réponse mécanique à la stimulation phrénique

La stimulation phrénique permet aussi l'étude des propriétés mécaniques du diaphragme. Les informations obtenues sont utilisées pour décrire quantitativement la contraction diaphragmatique, fournissant ainsi l'essentiel du diagnostic des dysfonctions diaphragmatiques. La stimulation phrénique en choc unique provoque une dépression intra-thoracique et une pression intra-abdominale positive, par conséquent une onde de pression trans-diaphragmatique (Pdi) positive (*fig. 5*) [12, 16]. La dynamique en est caractéristique, répondant à l'appellation de « secousse », ou « secousse unique » (*twitch*). On mesure l'amplitude de la déflexion de la Pdi de la ligne de base

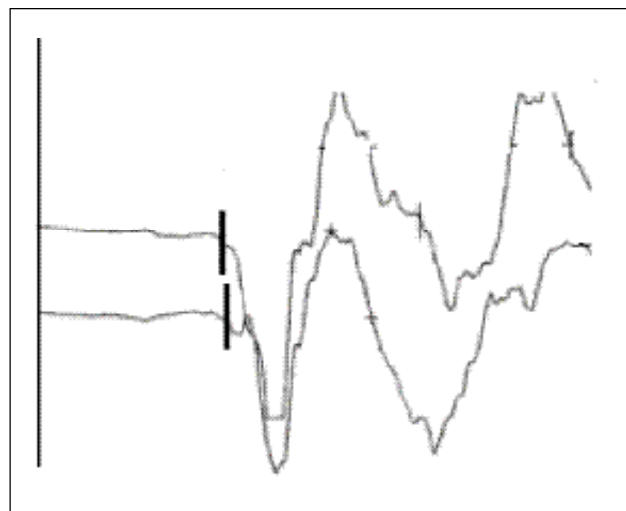


Fig. 5.

Réponse électromyographique de l'hémidiaphragme droit en réponse à deux stimulations magnétiques transcrâniennes consécutives. L'artéfact de stimulation est marqué par une barre continue noire, les temps de latence cortico-diaphragmatique par un trait, plus longs que lors de la stimulation magnétique cervicale.

du signal au pic de l'onde de pression. Chez des sujets sains d'âge jeune, une valeur supérieure à 20 cmH₂O en réponse à une stimulation phrénique électrique bilatérale au niveau du cou et à 25 cmH₂O en réponse à la stimulation magnétique cervicale [17] exclut quasiment une dysfonction diaphragmatique. En réponse à la stimulation électrique bilatérale ou à la stimulation magnétique cervicale, on peut enregistrer une pression à la bouche dont l'amplitude est corrélée à la Pdi [18], et qui permet aussi de séparer les patients souffrant d'une dysfonction diaphragmatique de ceux n'en souffrant pas, le chiffre de 10 cmH₂O étant considéré discriminant [19]. Néanmoins, cette technique souffre de l'ouverture ou la fermeture des voies aériennes, en particulier de la glotte. De façon standardisée, la stimulation phrénique doit être à volume pulmonaire constant, et en particulier à la capacité résiduelle fonctionnelle.

Stimulation magnétique transcrânienne

La commande des muscles respiratoires, diaphragme compris, est automatique ou volontaire [20]. La stimulation magnétique transcrânienne permet d'activer de façon simple et indolore la voie cortico-spinale vers le diaphragme (commande volontaire). Il est prudent d'éviter cette stimulation magnétique chez des patients ayant un passé épileptique, des antécédents de neurochirurgie intracrânienne, ou bien porteurs de stimulateurs. La stimulation magnétique transcrânienne permet d'évoquer une réponse diaphragmatique motrice, et de définir la nature centrale ou périphérique d'une anomalie diaphragmatique [21]. En routine clinique, la stimulation non focale, appliquée au niveau du vertex avec une bobine circulaire de 90 mm de diamètre est la plus utilisée. Dans la mesure où l'objectif de l'étude de la réponse diaphragmatique à la stimulation transcrânienne est surtout la détermination du niveau central ou périphérique d'une anomalie, on n'étudie pas la réponse en pression du diaphragme mais uniquement la réponse électromyographique en réponse à un choc unique, avec des électrodes de surface placées entre les 7^{ème} et 8^{ème} espaces intercostaux, permettant le recueil d'un signal spécifique [22]. Le temps de latence cortico-diaphragmatique moyen est de 17,5 ms (fig. 5).

Conclusion

Explorer la fonction du diaphragme doit reposer sur des principes simples, commençant par l'examen clinique, et intégrant une démarche globale où les examens très spécialisés, s'ils sont indispensables souvent, ne doivent pas être uniques. Ces examens sont encore de disponibilité limitée, et la codification de leurs indications et interprétations reste imparfaite. L'avènement de techniques atraumatiques pour étudier la fonction du nerf

phrénique et du diaphragme, ont modifié les perspectives de développement de l'exploration diaphragmatique.

Références

- 1 Perez T : Comment explorer en première intention les muscles respiratoires. *Rev Mal Respir* 2005 ; 22 : 2S37-2S46.
- 2 Alexander C : Diaphragm movements and the diagnosis of diaphragmatic paralysis. *Clin Radiol* 1966 ; 17 : 79-83.
- 3 Verin E, Delafosse C, Straus C, Morelot-Panzini C, Avdeev S, Derenne JP, Similowski T : Effects of muscle group recruitment on sniff transdiaphragmatic pressure and its components. *Eur J Appl Physiol* 2001 ; 85 : 593-8.
- 4 Cassat M, Pettiaux N, Gevenois PA, Paiva M, Estenne M : Effect of chronic hyperinflation on diaphragm length and surface area. *Am J Respir Crit Care Med* 1997 ; 156 : 504-8.
- 5 Cluzel P, Similowski T, Chartrand-Lefebvre C, Zelter M, Derenne JP, Grenier PA : Diaphragm and chest wall: Assessment of the inspiratory pump with mr imaging-preliminary observations. *Radiology* 2000 ; 215 : 574-83.
- 6 Similowski T : Exploration de la fonction du diaphragme. Encyclopédie Médico-Chirurgicale 2001 ; *Pneumologie* : 6-000-N-90.
- 7 Delhez L : Électromyographie du diaphragme chez l'homme. *Electromyography* 1968 ; 8 : 253-5.
- 8 Luo YM, Lyall RA, Lou Harris M, Rafferty GF, Polkey MI, Moxham J : Quantification of the esophageal diaphragm electromyogram with magnetic phrenic nerve stimulation. *Am J Respir Crit Care Med* 1999 ; 160 : 1629-34.
- 9 Aubier M, Murciano D, Lecocquic Y, Virens N, Pariente R : Bilateral phrenic stimulation: A simple technique to assess diaphragmatic fatigue in humans. *J Appl Physiol* 1985 ; 58 : 58-64.
- 10 Delhez L : Électromyographie du diaphragme chez l'homme. *Arch Int Physiol Biochim* 1965 ; 73 : 832-9.
- 11 Rajanna B : Anatomical and surgical consideration of the phrenic nerves. *J Internat Coll Surg* 1948 ; 10 : 42-52.
- 12 Similowski T, Heury B, Launois S, Cathala HP, Bouche P, Derenne JP : Stimulation magnétique cervicale. Une nouvelle méthode de stimulation du nerf phrénique bilatérale utilisée en pratique clinique. *Rev Mal Respir* 1988 ; 5 : 609-14.
- 13 Similowski T, Meheri S, Duguet A, Attali V, Straus C, Derenne JP : Comparison of magnetic and electrical phrenic nerve stimulation in assessment of phrenic nerve conduction time. *J Appl Physiol* 1997 ; 82 : 1190-99.
- 14 Verin E, Straus C, Demoule A, Mialon P, Derenne JP, Similowski T : Validation of improved recording site to measure phrenic conduction from surface electrodes in humans. *J Appl Physiol* 2002 ; 92 : 967-74.
- 15 Similowski T, Duguet A, Straus C, Attali V, Boisteau D, Derenne JP : Assessment of the voluntary activation of the diaphragm using cervical and cortical magnetic stimulation. *Eur Respir J* 1996 ; 9 : 1224-31.
- 16 Similowski T, Fleury B, Launois S, Cathala H, Bouche P : Cervical magnetic stimulation: A new and painless method for bilateral phrenic nerve stimulation in conscious man. *J Appl Physiol* 1989 ; 67 : 1311-8.
- 17 Hamnegard CH, Wragg SD, Mills GH, Kyroussis D, Polkey MI, Bake B, Moxham J, Green M : Clinical assessment of diaphragm strength by cervical magnetic stimulation of the phrenic nerves. *Thorax* 1996 ; 51 : 1239-42.

- 18 Yan S, Gauthier AP, Similowski T, Macklem PT, Bellemare F : Evaluation of human diaphragm contractility using mouth pressure twitches. *Am Rev Respir Dis* 1992 ; 145 : 1064-9.
 - 19 Smilowski T, Gauthier AP, Yan S, Macklem PT, Bellemare F : Assessment of diaphragm function using mouth pressure twitches in chronic obstructive pulmonary disease patients. *Am Rev Respir Dis* 1993 ; 147 : 850-6.
 - 20 Straus C : Comment est contrôlée la fonction des muscles respiratoires ? *Rev Mal Respir* 2005 ; 22 : 2S19-2S28.
 - 21 Similowski T, Straus C, Attali V, Duguet A, Jourdain B, Derenne JP : Assessment of the motor pathway to the diaphragm using cortical and cervical magnetic stimulation in the decision-making process of phrenic pacing. *Chest* 1996 ; 110 : 1551-7.
 - 22 Demoule A, Vérin E, Locher C, Derenne JP, Similowski T : Validation of surface recordings of the diaphragm response to transcranial magnetic stimulation in humans. *J Appl Physiol* 2003 ; 94 : 453-61.
-