

Corrélations phénotype-génotype dans les titinopathies

Raul Juntas-Morales^{1,2}, Aurélien Perrin¹, Mireille Cossée¹

Les pathologies dues à des variants pathogènes du gène *TTN* codant la titine ou titinopathies représentent un groupe important et très hétérogène de maladies du muscle squelettique. Ce même gène *TTN* est par ailleurs considéré aujourd'hui comme le principal gène impliqué dans les cardiomyopathies dilatées avec une prévalence de 17 % [1].

Les deux premiers phénotypes de titinopathies à avoir été décrits étaient de transmission autosomique dominante : la dystrophie musculaire tibiale (TMD) et la myopathie héréditaire avec atteinte respiratoire précoce (HMERF). Étant donné que seule la région 3' du gène était initialement étudiée avec les techniques classiques de séquençage, tous les variants pathogènes responsables de ces premiers phénotypes étaient jusqu'ici localisés dans cette région.

Grâce à l'émergence du séquençage à haut débit (NGS) et à une analyse exhaustive des 364 exons du gène, il a été possible d'identifier de nouveaux phénotypes et de confirmer l'existence de variants pathogènes répartis dans d'autres régions du gène.

Premières descriptions

Dystrophie musculaire tibiale (TMD)

La TMD est une myopathie distale dominante d'apparition tardive rapportée initialement de manière exclusive en Finlande du fait d'un effet fondateur. Dans ce pays, elle représente la forme la plus fréquente de myopathie chez les adultes [2]. Le déficit moteur reste très localisé au niveau des muscles releveurs des pieds et l'évolution de la pathologie est très lente. La biopsie musculaire, généralement peu altérée, montre habituellement de la fibrose et des vacuoles bordées [2]. En 2002, une délétion/insertion de 11 pb dans le dernier exon du gène (exon 364), a été identifiée chez tous les patients finlandais diagnostiqués (mutation FINmaj). La conséquence au niveau de la protéine est une substitution de quatre acides aminés [3]. Depuis, d'autres variants pathogènes, majoritairement dans l'exon 364 (mais aussi dans le 363), ont été identifiés par la suite chez des familles originaires d'autres

pays européens présentant le même phénotype [4-6].

Plus récemment, des formes de dystrophie musculaire tibiale de transmission autosomique récessive (AR), d'apparition plus précoce et d'évolution plus rapide, ont été décrites chez des patients hétérozygotes composés portant le variant FINmaj associé à un deuxième variant [9]. Par ailleurs, en 2017, une étude a rapporté une série de 14 patients d'origine serbe avec un phénotype de myopathie distale porteurs du même variant non-sens (c.107635C>T ; p.Gln35879*) dans l'exon 363 du gène *TTN* (avec un effet fondateur probable dans cette population). Trois patients étaient homozygotes et les autres étaient hétérozygotes composés avec un deuxième variant localisé, dans la plupart des cas, dans la région codant la bande M [10].

Par ailleurs, un phénotype sévère de myopathie des ceintures a été décrit (LGMD de type R10 ou anciennement 2), chez des patients finlandais porteurs de la mutation FINmaj à l'état homozygote. Hors de Finlande, des phénotypes similaires ont été décrits. Cependant le variant FINmaj à l'état hétérozygote était associé à un second variant tronquant (une famille française et une autre chinoise) [11-13].

Myopathie héréditaire avec atteinte respiratoire précoce (HMERF)

La myopathie HMERF débute habituellement dans la première ou deuxième décennie de vie par un déficit distal des membres inférieurs s'étendant par la suite aux muscles proximaux. Un syndrome restrictif respiratoire grave se développe systématiquement de manière précoce dans l'évolution de cette pathologie. La biopsie montre typiquement la présence de corps cytoplasmiques. Initialement, la plupart des patients partageaient le même variant faux-sens dans l'exon 344 (c.95134T>C ; p.Cys31712Arg) [7]. Le phénotype clinique a été élargi ces dernières années avec un début plus tardif des symptômes (cinquième ou sixième décennie) et une atteinte cardiaque qui peut survenir pendant l'évolution. Sur le plan génétique, d'autres variants faux-sens ont été rapportés, également dans l'exon 344 [8].

Raul Juntas Morales
Laboratoire de Génétique
Moléculaire, EA7402,
Centre Hospitalier
Universitaire de
Montpellier, Université de
Montpellier, France
Service de Neurologie,
Centre de référence des
Maladies
Neuromusculaires AOC
(Atlantique-Occitanie-
Caraïbe) Centre
Hospitalier Universitaire
de Montpellier, France

**Aurélien Perrin,
Mireille Cossée**
Laboratoire de Génétique
Moléculaire, EA7402,
Centre Hospitalier
Universitaire de
Montpellier, Université de
Montpellier, France

Contact
r-juntasmorales@
chu-montpellier.fr

Élargissement du spectre clinique des titinopathies

Titinopathie de type « Emery-Dreifuss-like »

Cette titinopathie a été décrite chez des patients présentant un phénotype de myopathie rétractile d'apparition précoce. Les rétractions étaient diffuses mais prédominaient au niveau des biceps brachiaux. Une atteinte respiratoire était associée chez tous les patients. Tous les variants étaient localisés dans la région du gène codant la bande M [14].

Par ailleurs, plusieurs phénotypes différents de myopathie congénitale ont été rapportés : la myopathie précoce avec cardiomyopathie dilatée fatale et la myopathie à multiminicores avec atteinte cardiaque ont été décrites notamment par l'équipe d'Ana Ferreira à Paris, et plus récemment, des phénotypes de type arthrogrypose multiplex congenita et myopathie de type centronucléaire ont été rapportés [15-18] *Tableau I*).

Myopathie précoce avec cardiomyopathie dilatée fatale

La myopathie précoce avec cardiomyopathie dilatée fatale a été décrite chez 5 patients issus de deux familles consanguines qui présentaient un déficit musculaire modéré accompagné d'une pseudo-hypertrophie des mollets, d'un ptosis bilatéral et d'une parésie faciale. La cardiomyopathie, d'apparition précoce, a conduit au décès des patients avant l'âge de 20 ans. Deux variants homozygotes et décalant le cadre de lecture (*frameshift*) ont été identifiés dans les exons 359 et 361. Ces variants provoquent la perte de la partie C-terminale de la protéine et notamment du site de liaison à la calpaïne 3, dans l'exon 363, ce qui explique l'absence de cette dernière dans les études par western-blot (WB) réalisées sur les biopsies musculaires de tous les patients étudiés [15].

Myopathie congénitale à multiminicores avec cardiomyopathie

La myopathie à multiminicores avec atteinte cardiaque a été initialement rapportée chez cinq patients appartenant à quatre familles différentes. Le phénotype clinique et histologique était celui d'une myopathie à multiminicores avec la présence de rétractions au niveau du rachis (*rigid spine*). La particularité était la présence d'une cardiomyopathie, qui n'est habituellement pas présente dans les formes classiques de myopathie à multiminicores secondaires à des variants des gènes *SEPN1* et *RYR1*. Sur le plan génétique, deux familles portaient un variant tronquant homozygote situé dans

la région codant la bande M (exons 359 et 360) et les deux autres avaient un variant tronquant et un faux-sens en *trans*. Le variant faux-sens c.102439T>C ; p.Trp34072Arg d'une des familles était localisé dans le domaine kinase affectant un résidu très conservé et le variant faux-sens c.66920T>A ; p.Val22232Glu de la deuxième famille était situé dans l'exon 316, à la fin de la bande I, domaine de type fibronectine (Fn3) [16]. Ces variations faux-sens pourraient altérer la stabilité des domaines protéiques impactés mais également l'interaction avec d'autres protéines musculaires.

Myopathie de type centronucléaire

Cinq patients avec un phénotype différent et des anomalies histologiques évocatrices d'une myopathie de type « centronucléaire » avaient été rapportés en 2013 [17]. Cliniquement, ils présentaient un déficit moteur modéré à prédominance axiale et un syndrome restrictif respiratoire. Aucun patient n'avait développé de cardiomyopathie. Sur le plan histologique, un noyau central était visible dans 65 à 85 % des fibres musculaires, raison pour laquelle le diagnostic initialement suspecté était celui d'une myopathie centronucléaire. Tous les patients portaient deux variants *TTN* prédits pour décaler le cadre de lecture. Cependant, à la différence des autres formes de titinopathie congénitale, les variants étaient situés sur différentes régions du gène et aucun n'était localisé dans la bande M [17].

Dans le but de mieux caractériser l'histoire naturelle et le phénotype clinique et histologique des myopathies congénitales liées à des variants *TTN*, une cohorte internationale de 30 patients impliquant plusieurs centres experts dans le domaine a été analysée et publiée en 2018 [20]. Seuls les patients porteurs de deux variants tronquants avec décalage du cadre de lecture avaient été inclus dans la cohorte. Du point de vue clinique, il existait une atteinte axiale et des membres de sévérité légère à modérée dans la plupart des cas, accompagnée de rétractions musculaires des membres et paravertébrales. Un ptosis uni ou bilatéral, une discrète parésie faciale et un palais ogival étaient souvent présents. Un syndrome restrictif respiratoire était retrouvé dans environ 2/3 des cas. L'atteinte cardiaque était également fréquente. Sur le plan histologique, les biopsies montraient principalement une combinaison de trois types d'anomalies : internalisations nucléaires, anomalies de la taille des fibres, et minicores. Dans environ un tiers des cas, le diagnostic anatomopathologique retenu initialement était celui d'une myopathie centronucléaire. Sur le plan génétique, les différents variants étaient distribués tout le long du

| NOM | TRANSMISSION | ÂGE DE DÉBUT | PHÉNOTYPE | BIOPSIE MUSCULAIRE | VARIANTS GÉNÉTIQUES |
|--|---|--------------|--|--|---|
| Dystrophie musculaire tibiale (TMD) | AD Population finlandaise | > 35 ans | Déficit localisé des releveurs des pieds | Peu altérée Fibrose Vacuoles bordées | <ul style="list-style-type: none"> • Effet fondateur en Finlande : 11 bp indel dans le dernier exon du gène : 364 (Mutation FINMaj) [2] • En dehors de la Finlande mutations des exons 363 et 364 [4][5][6]. |
| Dystrophie musculaire tibiale à début précoce | AR Finlande Italie, Espagne Serbie | 20 ans | Déficit localisé des releveurs des pieds | Aspect dystrophique | <ul style="list-style-type: none"> • Variant FlnMaj associé à un autre variant [9] • Variant c.107635C>T ; p.(Gln35879*) dans l'exon 363 dans la population serbe associé à un autre variant. |
| Myopathie des ceintures LGMDR10/LGMD2J | AR Finlande Rares cas ailleurs | < 20 ans | Déficit proximal ceintures pelvienne et scapulaire Très évolutive | Vacuoles bordées | <ul style="list-style-type: none"> • Patients finlandais avec le variant FINmaj homozygote [21] ou hétérozygote composite avec un autre variant tronquant [9] • Une famille française avec un variant non-sens homozygote dans l'exon 364 [12]. Une famille chinoise avec un variant faux-sens homozygote dans l'exon 364 [13]. |
| Myopathie héréditaire avec atteinte respiratoire précoce (HMERF) | AD Rares cas AR | > 20 | Atteinte distale puis proximo-distale Très évolutive Atteinte respiratoire précoce | Corps cytoplasmiques Vacuoles bordées | <ul style="list-style-type: none"> • Variant majoritaire : c.95134T>C ; p.(Cys31712Arg) dans l'exon 344 [7] • Plus rares, d'autres variants faux-sens dans l'exon 344 [8] |
| Myopathie Emery Dreifuss-like | AR | < 10 ans | Déficit des ceintures Rétractions d'apparition précoce « rigid Spine » Atteinte respiratoire | Corps cytoplasmiques Vacuoles bordées Absence de minicores | <ul style="list-style-type: none"> • Variants décalant le cadre de lecture dans les 3 derniers exons du gène [14] |
| Myopathie précoce avec cardiopathie létale (EOMFC) | AR | Néonatale | Déficit moteur modéré Ptosis, parésie faciale Pseudo-hypertrophie des mollets Cardiomyopathie dilatée sévère et précoce Évolution rapide. Décès < 20 ans | Aspect dystrophique Minicores Dépôts basophiles en forme d'étoile. | <ul style="list-style-type: none"> • Deux familles consanguines portant un variant frameshift homozygote dans les exons 358 et 360 [15] |
| Myopathie congénitale à multiminicores avec cardiomyopathie | AR | < 20 ans | Déficit à prédominance axiale Rétractions diffuses avec « rigid spine » | Minicores Dépôts basophiles en forme d'étoile | <ul style="list-style-type: none"> • Deux familles avec 2 variants dans les exons 359 et 360 entraînant un décalage du cadre de lecture [16] • Deux familles avec un variant tronquant dans l'exon 359 associé avec un autre variant faux-sens dans une autre région (exons 28 et 316) [16] |
| Myopathie « centronucléaire » | AR | < 20 ans | Déficit axial et proximal modéré Parésie faciale Syndrome restrictif Absence de cardiomyopathie | Noyaux centraux dans la plupart des fibres musculaires Minicores | <ul style="list-style-type: none"> • Variants frameshift, non-sens ou d'épissage [17] • Distribution hétérogène sur différentes régions du gène [17] |
| Dystrophie musculaire proximale | AR | Adulte | Déficit proximal moins sévère que LGMD2J | Aspect dystrophique | <ul style="list-style-type: none"> • Une famille italienne et une autre finlandaise portant le variant FINmaj avec un autre variant faux-sens dans les exons 305 et 340 respectivement [22][9] • Une famille roumaine avec deux variants faux-sens [23] |
| LGMD avec cardiomyopathie | AD | Adulte | Cardiomyopathie sévère et LGMD modéré | Minicores | <ul style="list-style-type: none"> • Variant génétique bande A, trois familles françaises |
| Myopathie distale des membres inférieurs à prédominance postérieure | AD | Adulte | Déficit distal avec évolution proximale Atteinte des mollets | Noyaux centraux Minicores | <ul style="list-style-type: none"> • Deux familles françaises porteuses d'une délétion des exons 11 à 18 [24] (manuscrit en cours de préparation) |

Tableau I
Phénotypes cliniques, histologiques et variants génétiques identifiés dans les différentes formes de titinopathies.



Figure 1
Synthèse des phénotypes identifiés à apparition précoce.

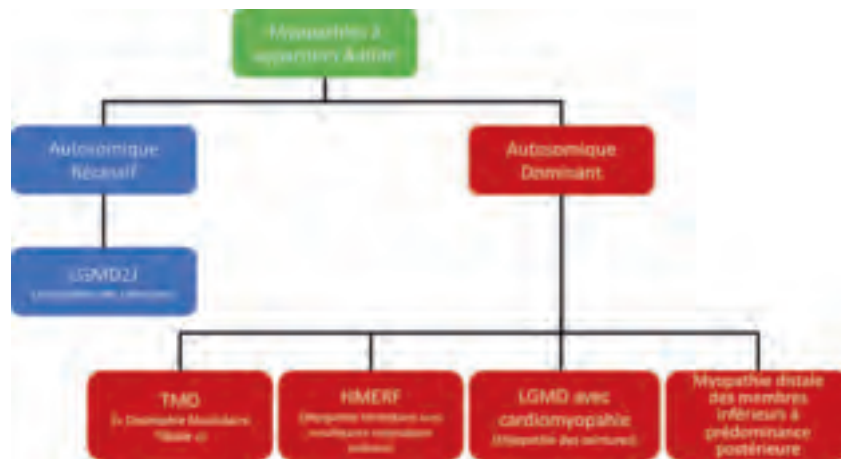


Figure 2
Synthèse des phénotypes identifiés à apparition plus tardive.

gène sans qu'une relation génotype-phénotype claire n'ait été identifiée. Concernant le type de variant, 1/3 étaient de type frameshift, 1/3 des non-sens et 1/3 des variants d'épissage [20].

Phénotypes récemment identifiés

Myopathie distale des membres inférieurs à prédominance postérieure

Deux familles avec un phénotype de myopathie distale à prédominance postérieure ont récemment été identifiées (manuscrit en cours de préparation). Au début de la maladie, ce nouveau phénotype distal implique principalement les muscles des mollets. Au cours de l'évolution de la maladie, le déficit s'étend au niveau des jambiers antérieurs et de la partie postérieure des cuisses. La biopsie musculaire montre une inégalité de la taille des fibres, de nombreuses centralisations nucléaires et des aspects de

minicores confirmés à la microscopie électronique. Le taux de CPK est normal. Les données de séquençage ont révélé une délétion hétérozygote des exons 11 à 18 induisant un décalage du cadre de lecture et l'apparition d'un codon stop prématuré. Une particularité de ce phénotype est son mode de transmission autosomique dominant. Il est intéressant de noter qu'il n'y a pas d'atteinte cardiaque chez ces patients, à l'inverse de ce que l'on observe dans les principaux phénotypes de titinopathies dominantes associées à des variants tronquants.

Myopathie à transmission autosomique dominante à atteinte cardiaque et squelettique (LGMD avec cardiomyopathie)

Un phénotype non décrit dans la littérature commence à émerger à partir des données remontant des centres de référence neuromusculaire. Ces patients présentent une atteinte cardiaque de type

cardiomyopathie dilatée associée à un déficit musculaire squelettique modéré et un phénotype de type myopathie des ceintures (LGMD pour *limb girdle muscular dystrophy*). Les titinopathies du muscle squelettique sont majoritairement de transmission AR, en dehors de tableaux de TMD et HMERF. À la différence d'autres phénotypes avec atteinte musculaire cardiaque et squelettique, celui-ci est associée à un mode de transmission autosomique dominant. Les mutations identifiées chez ces patients sont localisées dans la bande A. Contrairement aux données actuelles de la littérature où les variants tronquants hétérozygotes dans la bande A du gène *TTN* sont impliqués dans des tableaux de cardiomyopathie dilatée isolée, l'existence de ces familles démontre la possibilité d'une atteinte associée du muscle squelettique. Une évaluation exhaustive et systématique du muscle squelettique dans ces cas précis serait souhaitable.

Depuis l'article des *Cahiers de Myologie* de 2017 documenté par Ana Ferreiro [26], de nouveaux phénotypes continuent d'apparaître dans la littérature. Néanmoins, la physiopathologie de ces myopathies reste encore un mystère pour la majorité d'entre elles. C'est pourquoi il est important de documenter de façon exhaustive les titinopathies dans le but d'améliorer leur diagnostic et permettre une meilleure interprétation clinico-biologique des variants du gène *TTN* chez des patients suspectés de titinopathie (voir l'article de A. Perrin *et al.* dans ce numéro des *Cahiers de Myologie* (page 9), « Une approche clinico-biologique intégrée pour interpréter la pathogénicité des variants du gène de la titine »).

Phenotype-genotype correlations in titinopathies

LIENS D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent n'avoir aucun lien d'intérêt concernant les données publiées dans cet article.

RÉFÉRENCES

1. Fang HJ, Liu BP. Prevalence of *TTN* mutations in patients with dilated cardiomyopathy. *Herz* 2019 June 17. doi:10.1007/s00059-019-4825-4.
2. Udd B, Hakamies L, Partanen J, Laulumaa V, *et al.* Tibial muscular dystrophy: late adult-onset distal myopathy In 66 Finnish patients. *Arch Neurol* 1993 ; 50 : 604-8.
3. Hackman P, Vihola A, Haravuori H, *et al.* Tibial muscular dystrophy is a titinopathy caused by mutations in *TTN*, the gene encoding the giant skeletal-muscle protein titin. *Am J Hum Genet* 2002 ; 71 : 492-500.
4. Pollazzon M, Suominen T, Penttilä S, *et al.* The first Italian family with tibial muscular dystrophy caused by a novel titin mutation. *J Neurol* 2010 ; 257 : 575-9.
5. Van den Bergh PYK, Bouquiaux O, Verellen C, Marchand S, Richard I, Hackman P, Udd B. Tibial muscular dystrophy in a Belgian family. *Ann Neurol* 2003 ; 54 : 248-51.

6. Hackman P, Marchand S, Sarparanta J, *et al.* Truncating mutations in C-terminal titin may cause more severe tibial muscular dystrophy (TMD). *Neuromuscul Disord* 2008 ; 18 : 922-8.
7. Pfeffer G, Barresi R, Wilson IJ, *et al.* A P.15.7 A founder mutation in the titin gene is a common cause of myofibrillar myopathy with early respiratory failure. *Neuromuscul Disord* 2013 ; 23 : 280.
8. Palmio J, Leonard-Louis S, Sacconi S, *et al.* Expanding the importance of HMERF titinopathy: new mutations and clinical aspects. *J Neurol* 2019 ; 266 : 680-90.
9. Evilä A, Vihola A, Sarparanta J, *et al.* Atypical phenotypes in titinopathies explained by second titin mutations. *Ann Neurol* 2014 ; 75 : 230-40.
10. Perić S, Glumac JN, Töpf A, *et al.* A novel recessive *TTN* founder variant is a common cause of distal myopathy in the Serbian population. *Eur J Hum Genet* 2017 ; 25 : 572-81.
11. Udd B, Rapola J, Nokelainen P, Arikawa E, Somer H. Non-vacuolar myopathy in a large family with both late adult onset distal myopathy and severe proximal muscular dystrophy. *J Neurol Sci* 1992 ; 113 : 214-21.
12. Pénişon-Besnier I, Hackman P, Suominen T, Sarparanta J, Huovinen S, Richard-Crémieux I, Udd B. Myopathies caused by homozygous titin mutations: Limb-girdle muscular dystrophy 2J and variations of phenotype. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2010 ; 81 : 1200-2.
13. Zheng W, Chen H, Deng X, Yuan L, Yang Y, Song Z, Yang Z, Wu Y, Deng H. Identification of a novel mutation in the titin gene in a Chinese family with limb-girdle muscular dystrophy 2J. *Mol Neurobiol* 2016 ; 53 : 5097-102.
14. De Cid R, Ben Yaou R, Roudaut C, *et al.* A new titinopathy: Childhood-juvenile onset Emery-Dreifuss-like phenotype without cardiomyopathy. *Neurology* 2015 ; 85 : 2126-35.
15. Carmignac V, Salih MAM, Quijano-Roy S, *et al.* C-terminal titin deletions cause a novel early-onset myopathy with fatal cardiomyopathy. *Ann Neurol* 2007 ; 61 : 340-51.
16. Chauveau C, Bonnemann CG, Julien C, *et al.* Recessive *TTN* truncating mutations define novel forms of core myopathy with heart disease. *Hum Mol Genet* 2014 ; 23 : 980-91.
17. Ceyhan-Birsoy O, Agrawal PB, Hidalgo C, *et al.* Recessive truncating titin gene, *TTN*, mutations presenting as centronuclear myopathy. *Neurology* 2013 ; 81 : 1205-14.
18. Fernández-Marmiesse A, Carrascosa-Romero MC, Alfaro Ponce B, *et al.* Homozygous truncating mutation in prenatally expressed skeletal isoform of *TTN* gene results in arthrogryposis multiplex congenita and myopathy without cardiac involvement. *Neuromuscul Disord* 2017 ; 27 : 188-92.
19. Savarese M, Sarparanta J, Vihola A, Udd B, Hackman P. Increasing role of titin mutations in neuromuscular disorders. *J Neuromuscul Dis* 2016 ; 3 : 293-308.
20. Oates EC, Jones KJ, Donkervoort S, *et al.* Congenital Titinopathy: Comprehensive characterization and pathogenic insights. *Ann Neurol* 2018 ; 83 : 1105-24.
21. Udd B, Vihola A, Sarparanta J, Richard I, Hackman P. Titinopathies and extension of the M-line mutation phenotype beyond distal myopathy and LGMD2J. *Neurology* 2005 ; 64 : 636-42.
22. Evilä A, Udd B, Hackman P. A targeted next-generation sequencing panel for diagnostic use in primary myopathies. *Neuromuscul Disord* 2014 ; 24 : 800.
23. Dabby R, Sadeh M, Hilton-Jones D, Plotz P, Hackman P, Vihola A, Udd B, Leshinsky-Silver E. Adult onset limb-girdle muscular dystrophy. A recessive titinopathy masquerading as myositis. *J Neurol Sci* 2015 ; 351 : 120-3.
24. Zenagui R, Lacourt D, Pegeot H, *et al.* A reliable targeted next-generation sequencing strategy for diagnosis of myopathies and muscular dystrophies, especially for the giant titin and nebulin genes. *J Mol Diagn* 2018 ; 20 : 533-49.
25. Savarese M, Maggi L, Vihola A, *et al.* Interpreting genetic variants in titin in patients with muscle disorders. *JAMA Neurol* 2018 ; 75 : 557-65.
26. Ferreiro A, Urtizberea JA. Pathologies musculaires liées à la titine : un domaine en émergence. *Med Sci (Paris)* 2017 ; 33 (hors série 1 - Les Cahiers de Myologie) : 16-26.