



HAL
open science

Galerie 1. Jardin de courbes 1. Relation force-vitesse

Sylvain Louvet

► **To cite this version:**

| Sylvain Louvet. Galerie 1. Jardin de courbes 1. Relation force-vitesse. 2019. hal-01966066v2

HAL Id: hal-01966066

<https://hal.science/hal-01966066v2>

Preprint submitted on 13 Aug 2019

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.

Galerie 1

Jardin de courbes 1. Relation force-vitesse

Sylvain LOUVET ¹

13/08/2019

Résumé

Une fibre musculaire squelettique maintenue à une longueur fixe est téтанisée jusqu'à un plateau (T_0) puis elle subit un échelon de force (T). Après quelques millisecondes la fibre se raccourcit à une vitesse constante (V). Une relation entre T et V est proposée dans le Papier 1 (Louvet 2018) Nous confrontant l'équation à une trentaine d'exemples extraits de la littérature physiologique. L'équation répond correctement à différents critères expérimentaux comme la longueur initiale du sarcomère, la variation de l'espace inter-filamentaire (*lattice*), la typologie musculaire ou la température interne de la fibre,

¹ Laboratoire de Mécanique des Solides, UMR 6610, Chasseneuil Futuroscope, France

Email : sylvain.louvet@univ-nantes.fr

. Gallery 1

Curve garden 1. Force-velocity relationship

Abstract

A skeletal muscle fiber at a fixed length is tetanized to a plateau (T_0) and then undergoes a force step (T). After a few milliseconds the fiber is shortening at a constant speed (V). A relation between T and V is proposed in Paper 1 (ref). We confront the equation with thirty examples extracted from the physiological literature. The equation correctly answers various experimental criteria such as initial length of the sarcomere, the variation of the inter-filamentary space (lattice), the muscular typology or the internal temperature of the fiber.

Introduction

Tous les termes apparaissant dans les égalités et équations suivantes sont explicités dans le Papier 1.

Rappels

T0 est la tension (ou force) tétanique isométrique.

T est la tension (ou force) constante inférieure à T0 après un échelon de force.

pT est la tension relative égale à :

$$pT = T / T0 \quad (FV.1)$$

V est la vitesse de raccourcissement constante de la fibre musculaire lors de la phase 4 d'un échelon de force et u est le module de la vitesse de raccourcissement d'un demi-sarcomère (hs) tel que :

$$u = |V| / N_{hs} \quad (FV.2)$$

où N_{hs} est le nombre de hs par myofibrille.

Les évènements {startF}, {startS}, et {startVS} se réfèrent à l'initiation rapide (F pour *Fast*), lente (S pour *Slow*) et très lente (VS pour *Very Slow*) d'une tête de myosine II vers l'état de *working stroke* (WS).

L'évènement {SlowDE} se réfère au détachement lent (SDE pour *Slow DEtachment*) d'une tête de myosine II préalablement en WS.

Abscisses et étendues linéaires caractéristiques

Pas maximal d'une tête de myosine en WS :

$$\delta X_{Max} = |X_{up} - X_{down}|$$

Etendue linéaire correspondant à l'uniformité tétanique des têtes en WS :

$$\delta X_T = |X_{up} - X_T|$$

Etendue linéaire associée au détachement lent lors de la montée jusqu'au plateau tétanique puis à l'absence de tête en WS durant le plateau tétanique :

$$\delta X_E = |X_T - X_{down}| = \delta X_{Max} - \delta X_T$$

Etendue linéaire correspondant à l'uniformité tétanique des têtes liées fortement avant d'initier rapidement un WS :

$$\delta X_{pre} = |X_{up} - X_{pre}|$$

Egalité identitaire du modèle :

$$|X_{down}| = \delta X_{Max} - \delta X_T / 2$$

Abscisse liée à l'évènement {startS} lors du raccourcissement d'un hs à vitesse u :

$$X_S(u) = (X_{up} - u \cdot \tau_{preS}) \cdot \mathbf{1}_{[u \cdot \tau_{preS} < \delta X_{Max}]}(u)$$

Abscisse liée à l'évènement {startVS}, fonction de u :

$$X_{VS}(u) = (X_{up} - u \cdot \tau_{preVS}) \cdot \mathbf{1}_{[u \cdot \tau_{preVS} < \delta X_{Max}]}(u)$$

Abscisse liée à l'évènement {SlowDE}, fonction de u :

$$X_{SDE}(u) = (X_T - u \cdot \tau_{preSDE}) \cdot \mathbf{1}_{[u \cdot \tau_{preSDE} < \delta X_E]}(u)$$

Proportions maximales en fonction de u

Proportion maximale de têtes susceptibles d'initier un WS selon {startF} :

$$P_F(u) = p_{\text{startF}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\delta X_{\text{pre}} - u \cdot \tau_{\text{preSB}}}{u \cdot \tau_{\text{SB}}}} \right)$$

Proportion maximale de têtes susceptibles d'initier un WS selon {startS} :

$$P_S(u) = [p_{\text{startS}} + p_{\text{startF}} - P_F(u)] \cdot \mathbf{1}_{[u \cdot \tau_{\text{preS}} < \delta X_{\text{Max}}]}(u)$$

Proportion maximale de têtes susceptibles d'initier un WS selon startVS} :

$$P_{VS}(u) = (1 - p_{\text{startF}} - p_{\text{startS}}) \cdot \mathbf{1}_{[u \cdot \tau_{\text{preVS}} < \delta X_{\text{Max}}]}(u)$$

Proportion maximale de têtes susceptibles de se détacher lentement selon {SlowDE} :

$$P_{\text{SDE}}(u) = \left[P_F(u) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\delta X_T}{u \cdot \tau_{\text{startF}}}} \right) + P_S(u) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\delta X_T - u \cdot \tau_{\text{preS}}}{u \cdot \tau_{\text{startS}}}} \right) + P_{VS}(u) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\delta X_T - u \cdot \tau_{\text{preVS}}}{u \cdot \tau_{\text{startVS}}}} \right) \right] \cdot \mathbf{1}_{[u \cdot \tau_{\text{preSDE}} < \delta X_E]}(u)$$

Tensions relatives en fonction de u

Tension associée à l'évènement {startF} :

$$pT_F(u) = \frac{P_F(u) \cdot \delta X_{\text{Max}}}{|X_{\text{down}}| \cdot \delta X_T} \cdot \left[\frac{\delta X_{\text{Max}}}{2} - u \cdot \tau_{\text{startF}} + u^2 \cdot \frac{\tau_{\text{startF}}^2}{\delta X_{\text{Max}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\delta X_{\text{Max}}}{u \cdot \tau_{\text{startF}}}} \right) \right]$$

Tension associée à l'évènement {startS} :

$$pT_S(u) = \frac{P_S(u) \cdot (X_S + |X_{\text{down}}|)}{|X_{\text{down}}| \cdot \delta X_T} \cdot \left[\frac{(X_S + |X_{\text{down}}|)}{2} - u \cdot \tau_{\text{startS}} + \frac{u^2 \cdot \tau_{\text{startS}}^2}{(X_{VS} + |X_{\text{down}}|)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{X_S + |X_{\text{down}}|}{u \cdot \tau_{\text{startVS}}}} \right) \right]$$

Tension associée à l'évènement {startVS}

$$pT_{VS}(u) = \frac{P_{VS}(u) \cdot (X_{VS} + |X_{\text{down}}|)}{|X_{\text{down}}| \cdot \delta X_T} \cdot \left[\frac{(X_{VS} + |X_{\text{down}}|)}{2} - u \cdot \tau_{\text{startVS}} + \frac{u^2 \cdot \tau_{\text{startVS}}^2}{(X_{VS} + |X_{\text{down}}|)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{X_{VS} + |X_{\text{down}}|}{u \cdot \tau_{\text{startVS}}}} \right) \right]$$

Tension associée à l'évènement {SlowDE}

$$pT_{\text{SDE}}(u) = \frac{P_{\text{SDE}}(u) \cdot (X_{\text{SDE}} + |X_{\text{down}}|)}{|X_{\text{down}}| \cdot \delta X_T} \cdot \left[\frac{(X_{\text{SDE}} + |X_{\text{down}}|)}{2} - u \cdot \tau_{\text{SDE}} + \frac{u^2 \cdot \tau_{\text{SDE}}^2}{(X_{\text{SDE}} + |X_{\text{down}}|)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{X_{\text{SDE}} + |X_{\text{down}}|}{u \cdot \tau_{\text{SDE}}}} \right) \right]$$

Tension associée à la présence de la viscosité:

$$pT_{\text{visc}}(u) = \varepsilon \cdot u$$

Equations générales

Avec (FV1) et (FV2), il est équivalent de rechercher une relation entre T et V ou entre pT et u.

Tension relative (pT_{WS}) associée aux têtes en WS ayant initié leur WS selon un des 3 modes :

$$pT_{WS}(u) = pT_F(u) + pT_S(u) + pT_{VS}(u) \quad (FV3)$$

Tension relative théorique (pT_{th}) calculée en absence de viscosité :

$$\begin{aligned} pT_{th}(u) &= pT_{WS}(u) - pT_{SDE}(u) \\ &= pT_F(u) + pT_S(u) + pT_{VS}(u) - pT_{SDE}(u) \end{aligned} \quad (FV4)$$

Tension relative complète (pT) calculée en présence de viscosité:

$$\begin{aligned} pT(u) &= pT_{th}(u) - pT_{visc}(u) \\ &= pT_F(u) + pT_S(u) + pT_{VS}(u) - pT_{SDE}(u) - pT_{visc}(u) \end{aligned} \quad (FV5)$$

Relation entre nombre de têtes de myosine en *working stroke* (Λ) et u

Nombre de têtes en WS associé à l'évènement {startF} :

$$\Lambda_F(u) = \frac{\Lambda_0 \cdot P_F(u)}{\delta X_T} \cdot \left[\delta X_{Max} - u \cdot \tau_{startF} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\delta X_{Max}}{u \cdot \tau_{startF}}} \right) \right]$$

Nombre de têtes en WS associé à l'évènement {startS} :

$$\Lambda_S(u) = \frac{\Lambda_0 \cdot P_S(u)}{\delta X_T} \cdot \left[(X_S + |X_{down}|) - u \cdot \tau_{startS} \cdot \left(1 - e^{-\frac{X_S + |X_{down}|}{u \cdot \tau_{startS}}} \right) \right]$$

Nombre de têtes en WS associé à l'évènement {startVS} :

$$\Lambda_{VS}(u) = \frac{\Lambda_0 \cdot P_{VS}(u)}{\delta X_T} \cdot \left[(X_{VS} + |X_{down}|) - u \cdot \tau_{startVS} \cdot \left(1 - e^{-\frac{X_{VS} + |X_{down}|}{u \cdot \tau_{startVS}}} \right) \right]$$

Nombre de têtes se détachant lentement associé à l'évènement {SlowDE} :

$$\Lambda_{SDE}(u) = \frac{\Lambda_0 \cdot P_{SDE}(u)}{\delta X_T} \cdot \left[(X_{SDE} + |X_{down}|) - u \cdot \tau_{SDE} \cdot \left(1 - e^{-\frac{X_{SDE} + |X_{down}|}{u \cdot \tau_{SDE}}} \right) \right]$$

où Λ_0 est le nombre de têtes de myosine en WS par hs lors du plateau tétanique.

Nombre total de têtes en WS :

$$\Lambda(u) = \Lambda_F(u) + \Lambda_S(u) + \Lambda_{VS}(u) - \Lambda_{SDE}(u) \quad (FV6)$$

La relation entre pT et p Λ (p $\Lambda = \Lambda / \Lambda_0$) se déduit de (FV5) et (FV6).

Tensions maximales (u=0)

A partir des expressions (FV3), (FV4) et (FV5), les tensions maximales ($pT0_{ws}$, $pT0_{th}$ et $pT0$) atteintes lors du plateau tétanique, i.e. $u=0$, valent :

$$pT0_{ws} = pT_{ws}(0) = \frac{\delta X_{Max}^2}{2 \cdot \delta X_T \cdot |X_{down}|} \quad (FV7)$$

$$pT0 = pT0_{th} = pT(0) = \frac{\delta X_{Max}^2 - \delta X_E^2}{2 \cdot \delta X_T \cdot |X_{down}|}$$

Il est vérifié :

$$(\delta X_{Max}^2 - \delta X_E^2) = (\delta X_T^2 + 2 \cdot \delta X_T \cdot \delta X_E) = 2 \cdot \delta X_T \cdot |X_{down}|$$

Les égalités « $pT0 = pT0_{th} = 1$ » sont corroborées et il s'en déduit :

$$pT0_{ws} > 1$$

Vitesse maximale théorique de raccourcissement d'un hs en absence de viscosité

L'évènement {SB} est imputé à la liaison forte (SB pour *Strong Binding*) qui advient avant {startF}, l'évènement d'initiation rapide d'un WS. La vitesse maximale théorique d'un hs ($u_{Max,th}$) correspond à la condition limite de réalisation de {SB}, soit d'après la formulation de P_F , la proportion maximale associée à {startF} :

$$u_{Max,th} = \frac{\delta X_{pre}}{\tau_{preSB}} \quad (FV8a)$$

Avec (FV2), la vitesse maximale théorique de la fibre ($V_{Max,th}$) s'énonce:

$$V_{Max,th} = \frac{N_{hs} \cdot \delta X_{pre}}{\tau_{preSB}} \quad (FV8b)$$

Les vitesses maximales réelles u_{Max} et V_{Max} sont inférieures à, respectivement, $u_{Max,th}$ et $V_{Max,th}$, à cause de la présence de la viscosité qui freine les raccourcissements à vitesses élevées.

Méthode

Les équations précédentes sont confrontées aux points expérimentaux présentés dans diverses figures classiques de la littérature physiologique

Sur les pages impaires sont affichées sous forme de tables les valeurs des variables introduites dans les équations.

Chaque table se décompose en 4 parties :

- Partie 1 relative à la fibre : nom de l'animal donateur ; nom du muscle ; Γ est la température expérimentale ; T_0 est la tension du plateau tétanique ; L_0 est la longueur initiale de la fibre.

- Partie 2 relative au sarcomère et au demi-sarcomère (hs) : N_{hs} est le nombre de hs par myofibrille ; L_{0s} est la longueur initiale du sarcomère ; p_{startF} , p_{startS} et $p_{startVS}$ sont les pourcentage de têtes en WS par hs en conditions d'isométrie tétanique selon le mode d'initiation du WS, rapide, lent et très lent ; ε est le coefficient de proportionnalité entre la tension relative d'origine visqueuse et u ; $u_{Max,th}$ est la vitesse maximale théorique (sans viscosité) de raccourcissement d'un hs égale à $\delta X_{pre}/\tau_{preSB}$; u_{Max} est la vitesse maximale expérimentale (avec viscosité) de raccourcissement d'un hs calculée par interpolation.

- Partie 3 relative à la tête de myosine et à sa géométrie : δX_{Max} , δX_T , δX_{pre} sont des étendues linéaires définissant des zones et domaines de raccourcissements associées aux étendues angulaires $\delta\theta_{Max}$, $\delta\theta_T$, $\delta\theta_{pre}$ correspondant à des rotations du levier.

- Partie 4 relative aux paramètres temporels des réactions du cross-bridge cycle : τ_{preSB} et τ_{SB} sont le retard et la durée moyenne de l'évènement {SB}, i.e. liaison forte ; τ_{startF} , τ_{preS} , τ_{startS} , τ_{preVS} , $\tau_{startVS}$ sont les retards et durées moyennes des 3 évènements {startF}, {startS} et {startVS}, i.e. initiations du WS rapide, lente et très lente ; τ_{preSDE} et τ_{SDE} sont le retard et la durée moyenne de l'évènement {SlowDE}, i.e. détachement lent.

r^2 est le coefficient de détermination défini au paragraphe statistique.

Remarque

Dans le papier compagnon 4, le coefficient ε est calculé dans des conditions standard (pH=7, R=1, pCa=4.5, $\Gamma=2^\circ\text{C}$) pour une fibre extraite du muscle *tibialis anterior* chez 2 espèces de grenouilles, soit :

$$Rana\ Temporaria : \quad \varepsilon \approx 0.01 \text{ ms.nm}^{-1}$$

$$Rana\ Esculenta : \quad \varepsilon \approx 0.015 \text{ ms.nm}^{-1}$$

La méthode qui a présidé à la détermination de ces 2 données est utilisée pour évaluer le coefficient visqueux ε dans des conditions expérimentales différentes (voir supplément S4.J du papier 4). Ainsi, une augmentation de la température occasionne une baisse de ε , et une diminution de la distance inter-filamentaire (*lattice*) engendre une élévation de ε .

Sur les pages paires, les tracés en trait continu représentent les relations Force-Vitesse d'après les équations. La couleur du trait correspond à la couleur de la colonne de la table placée en vis-à-vis du graphique.

Statistique

Une régression linéaire est effectuée entre les valeurs de tensions mesurées (points relevés sur les figures des articles recensés) et les valeurs de tensions théoriques calculées à vitesses identiques. La droite de régression passe par l'origine, soit :

$$Y = p \cdot X$$

où Y caractérise les valeurs des tensions théoriques et X celles des tensions expérimentales ; p est la pente de la droite de régression égale à :

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2}$$

Par définition, le coefficient de détermination vaut :

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - p \cdot X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Plus p et r^2 sont proches de 1, plus le modèle se révèle adéquat.

Le coefficient r^2 apparaît à la dernière la ligne de chaque table.

Résultats

Courbe FV1 d'après les Fig 2A et 2B dans (Edman 1988)

But : Données et graphique référent avec vérification de l'homogénéité intrinsèque du modèle.

Table FV1 : Valeurs des paramètres

	Fibre (REF)	Segment
Animal	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾
Muscle	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾
Γ	1°C	1°C
T0	163 kPa	165 kPa
L0	6.3 mm	0.6 mm
N _{hs}	6000	570
L0 _s	2.1 μm	2.1 μm
P _{startF}	0.6	0.6
P _{startS}	0.3	0.3
P _{startVS}	0.1	0.1
ε (ms·nm ⁻¹)	0.01	0.01
u _{Max,th} (nm·ms ⁻¹ par hs)	2.31	2.4
u _{Max} (nm·ms ⁻¹ par hs)	2.14	2.19
δX_{Max}	11.5 nm	11.5 nm
δX_{T}	8 nm	8 nm
δX_{pre}	6 nm	6 nm
τ_{preSB}	2.6 ms	2.5 ms
τ_{SB}	6 ms	6.5 ms
τ_{startF}	0.7 ms	0.7 ms
τ_{startS}	3.5 ms	3.5 ms
τ_{startS}	25 ms	25 ms
τ_{preVS}	80 ms	80 ms
τ_{startVS}	90 ms	80 ms
τ_{preSDE}	5 ms	5 ms
τ_{SDE}	18 ms	18 ms
r ²	99.9%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Temporaria* ⁽²⁾ *Muscle Tibialis Anterior*

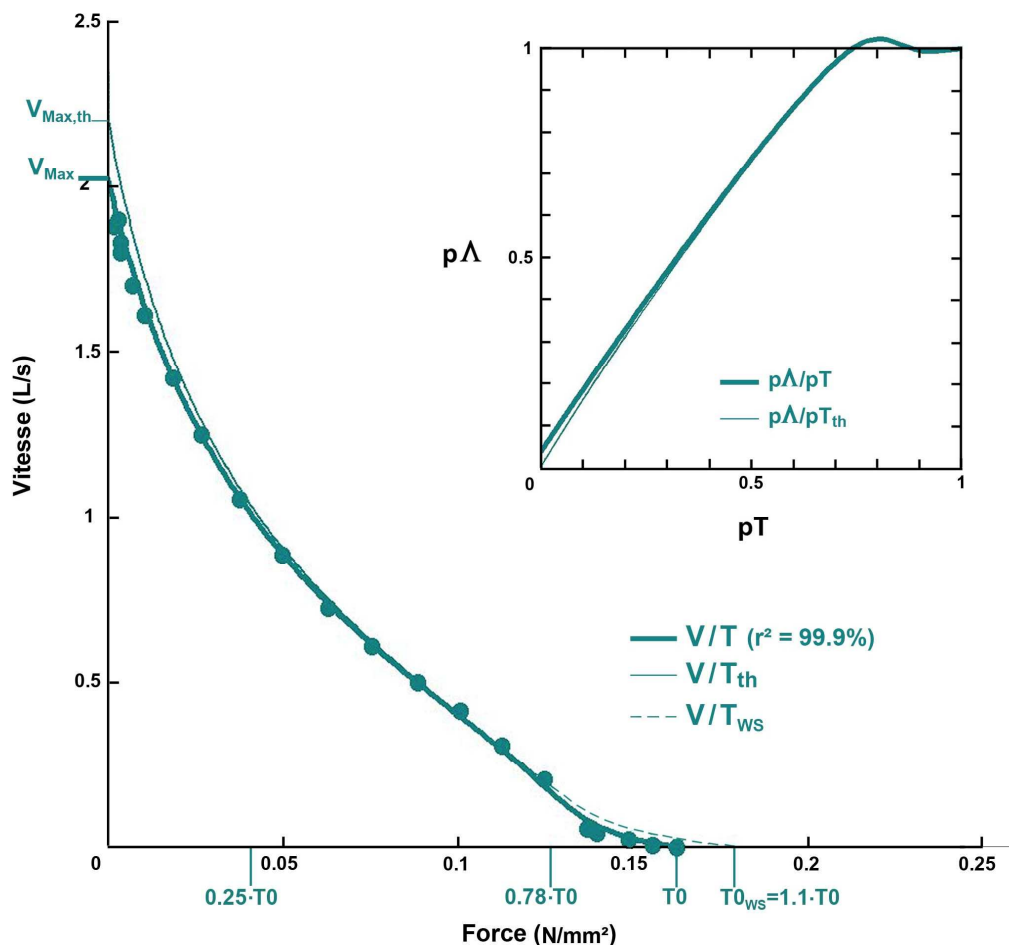


Fig FV1 : Relation Force-Vitesse (L est une unité se rapportant à la longueur initiale de la fibre testée, i.e. V mesurée en mm/s est divisée par L0) en trait bleu-vert. Les relations V/T_{WS} , V/T_{th} et V/T sont tracées, respectivement, en pointillés, avec un trait continu fin et avec un trait continu épais d'après les équations (FV3), (FV4) et (FV5) à l'appui de (FV1) et (FV2). Les points proviennent de la Fig 2A dans (Edman 1988). En insert, la relation du nombre relatif de têtes en WS ($p\Delta$) en fonction de pT selon (FV5) et (FV6) et en fonction de pT_{th} selon (FV4) et (FV6).

Remarques

Le tracé de V/T en trait bleu-vert épais est réalisé à partir des données de la colonne « Fibre (REF) ». Une différence apparaît entre les tracés V/T et V/T_{WS} (trait en pointillés) pour les valeurs de tensions élevées supérieures à 78% de T_0 ; la valeur de T_{0WS} est déterminée d'après (FV7). Un écart est observé entre les tracés V/T et V/T_{th} (trait fin) pour les valeurs de tensions basses inférieures à 25% de T_0 . L'influence de la viscosité est minime mais n'est pas négligeable : il apparaît une différence de 7% entre V_{Max} et $V_{Max,th}$; la valeur de $V_{Max,th}$ est calculée avec (FV8b). Dans l'insert, le nombre de têtes de myosine en WS est approximativement constant pour $T \geq 0.75 \cdot T_0$, et décroît linéairement de $0.75 \cdot T_0$ jusqu'aux très faibles valeurs de tension.

Les données de la colonne « Segment » de la Table FV1 se rapporte aux points relevés sur la Fig 2B dans (Edman 1988), i.e. au raccourcissement d'un segment de 0.6 mm interne à la fibre testée. Les valeurs sont quasi identiques à celles relatives au raccourcissement total de la fibre. Ceci démontre l'homogénéité des 2 relations (FV1) et (FV2) au sein de la fibre ou d'une myofibrille.

Courbes FV2 d'après Fig 3 dans (Edman 1988)

But Influence de la longueur initiale du sarcomère (L_{0s}),

Durant le plateau tétanique précédant l'échelon de force et le raccourcissement à vitesse constante, la fibre est en conditions isométriques, i.e à une longueur fixe (L_0) qui détermine la longueur moyenne de chaque sarcomère telle que :

$$L_{0s} = L_0 / (N_{hs} / 2)$$

Table FV2 : Valeurs des paramètres

L_{0s}	1.85 μm (Fig 3A ds Edman)	2.1 μm (Fig 3B ds Edman)	2.3 μm (Fig 3C ds Edman)	2.6 μm (Fig 3D ds Edman)
Animal	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾
Muscle	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾
Γ	1°C	1°C	1°C	1°C
T0	246 kPa	257 kPa	237 kPa	186 kPa
L0	7.4 mm	8.35 mm	9.15 mm	10.35 mm
N_{hs}	8000	8000	8000	8000
P_{startF}	0.63	0.62	0.61	0.57
P_{startS}	0.25	0.28	0.27	0.28
$P_{startVS}$	0.12	0.1	0.12	0.15
ε ($\text{ms}\cdot\text{nm}^{-1}$)	0.01	0.01	0.01	0.01
$u_{Max,th}$ ($\text{nm}\cdot\text{ms}^{-1}$ par hs)	2.4	2.4	2.4	2.4
u_{Max} ($\text{nm}\cdot\text{ms}^{-1}$ par hs)	2.12	2.11	2.04	2.15
δX_{Max}	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm
δX_T	7 nm	8 nm	8 nm	8 nm
δX_{pre}	6 nm	6 nm	6 nm	6 nm
τ_{preSB}	2.5 ms	2.5 ms	2.5 ms	2.5 ms
τ_{SB}	8 ms	6.5 ms	7 ms	7.5 ms
τ_{startF}	0.7 ms	0.7 ms	0.7 ms	0.7 ms
τ_{preS}	3.5 ms	3.5 ms	3.5 ms	3.5 ms
τ_{startS}	25 ms	25 ms	25 ms	25 ms
τ_{preVS}	80 ms	80 ms	80 ms	80 ms
$\tau_{startVS}$	90 ms	90 ms	90 ms	90 ms
τ_{preSDE}	5 ms	5 ms	5 ms	5 ms
τ_{SDE}	18 ms	18 ms	18 ms	18 ms
R^2	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Temporaria* ⁽²⁾ *Muscle Tibialis Anterior*

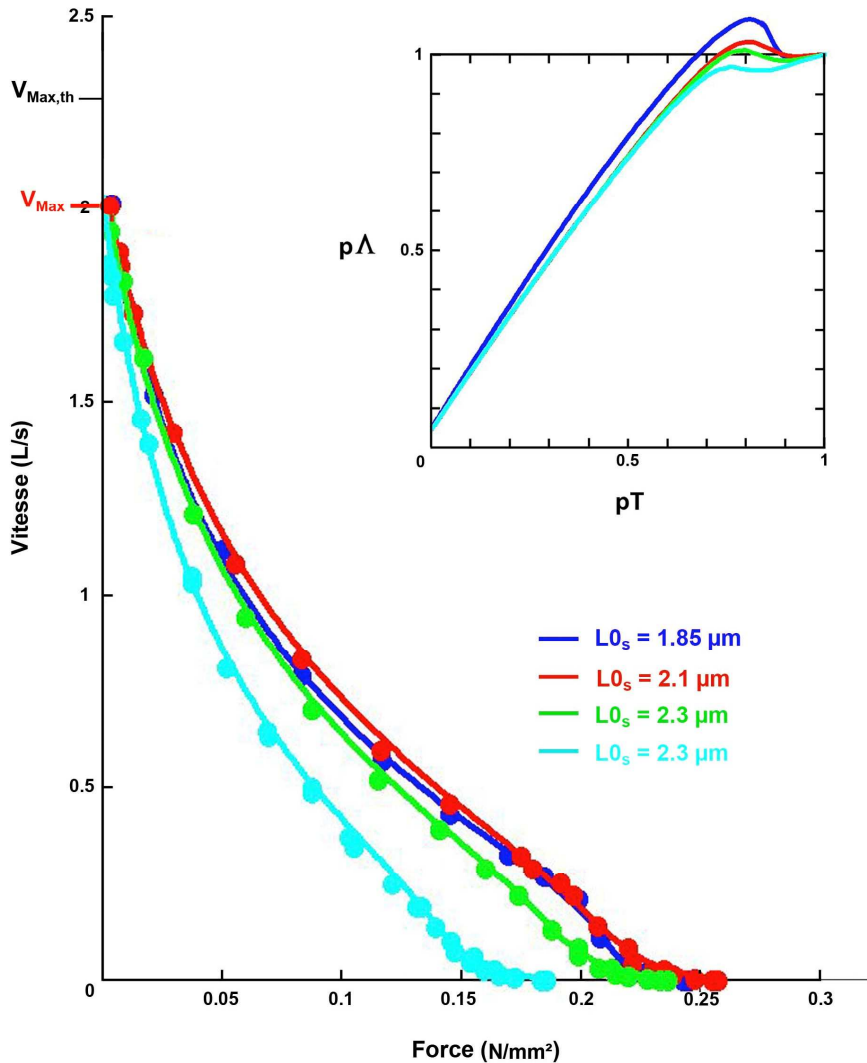


Fig FV2 : Relations Force-Vitesse en trait continu d'après (FV5) pour 4 longueurs initiales du sarcomère. L est une unité se rapportant à la longueur initiale de la fibre en conditions standard, i.e. V mesurée en mm/s est divisée par « $L_{0,2.1\mu\text{m}} = 8.35 \text{ mm}$ » dans les 4 cas. Les points proviennent des Fig 3A, 3B, 3C et 3D dans (Edman 1988). En insert, la relation du nombre relatif de têtes en WS (Λ/Λ_0) en fonction de la tension relative (T/T_0).

Remarques

Les constantes de temps relatives à $L_{0s}=2.1 \mu\text{m}$ sont semblables à celles du tracé référent (Fig FV1). Il s'agit de la longueur pour laquelle T_0 est la plus élevée et τ_{SB} est la plus faible : $2.1 \mu\text{m}$ est la longueur pour laquelle le raccourcissement de la fibre est le plus efficient.

L'étendue δX_T est diminuée pour $L_{0s}=1.85 \mu\text{m}$, à cause du recouvrement inter-filamentaire excessif.

Les valeurs des vitesses maximales théoriques et observées sont égales pour les 4 tracés. Ceci valide l'hypothèse formulée dans le Papier 4 selon laquelle les éléments massifs (disques Z associés aux filaments d'actine et disques M associés aux filaments de myosine) sont les structures responsables des actions de la viscosité, le nombre de têtes de myosine en WS jouant un rôle négligeable.

Dans l'insert de la Fig 3, aux tensions proches de $0.8 \cdot T_0$, le pic du nombre de têtes en WS diminue notamment en fonction de la valeur de p_{startF} . Les 3 tracés de $p\Lambda/pT$ relatifs à $2.1, 2.3$ et $2.6 \mu\text{m}$ sont analogues à celui du graphique référent de la Fig FV1. Le tracé se rapportant à $L_{0s}=1.85 \mu\text{m}$ est au dessus des 3 autres, notamment pour $pT < 70\%$ où la différence est due à la diminution de l'étendue δX_T .

Courbes FV3 d'après Fig 4 dans (Edman 1988)

But tester l'influence de la distance inter-filamentaire.

L'augmentation de la tonicité de la solution Ringer de 1R à 1.44R comprime osmotiquement le liquide cellulaire et diminue l'espace inter-filamentaire.

Table FV4 : Valeurs des paramètres

	1 R	1.44 R
Animal	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾
Muscle	MTA ⁽²⁾	MTa ⁽²⁾
Γ	1.6°C	1.6°C
T0	164 kPa	130 kPa
L0	6.3 mm	6.3 mm
N_{hs}	6000	6000
$L0_s$	2.1 μm	2.1 μm
P_{startF}	0.61	0.61
P_{startS}	0.26	0.3
$P_{startVS}$	0.13	0.09
ε ($\text{ms}\cdot\text{nm}^{-1}$)	0.01	0.014
$u_{Max,th}$ ($\text{nm}\cdot\text{ms}^{-1}$ par hs)	2.22	1.4
u_{Max} ($\text{nm}\cdot\text{ms}^{-1}$ par hs)	2.06	1.32
δX_{Max}	11.5 nm	11.5 nm
δX_T	8 nm	9.5 nm
δX_{pre}	6 nm	6 nm
τ_{preSB}	2.7 ms	4.3 ms
τ_{SB}	6.5 ms	12 ms
τ_{startF}	0.7 ms	0.7 ms
τ_{preS}	3.5 ms	5 ms
τ_{startS}	25 ms	30 ms
τ_{preVS}	90 ms	100 ms
$\tau_{startVS}$	90 ms	120 ms
τ_{preSDE}	5 ms	10 ms
τ_{SDE}	18 ms	25 ms
r^2	99.8%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Temporaria* ⁽²⁾ *Muscle Tibialis Anterior*

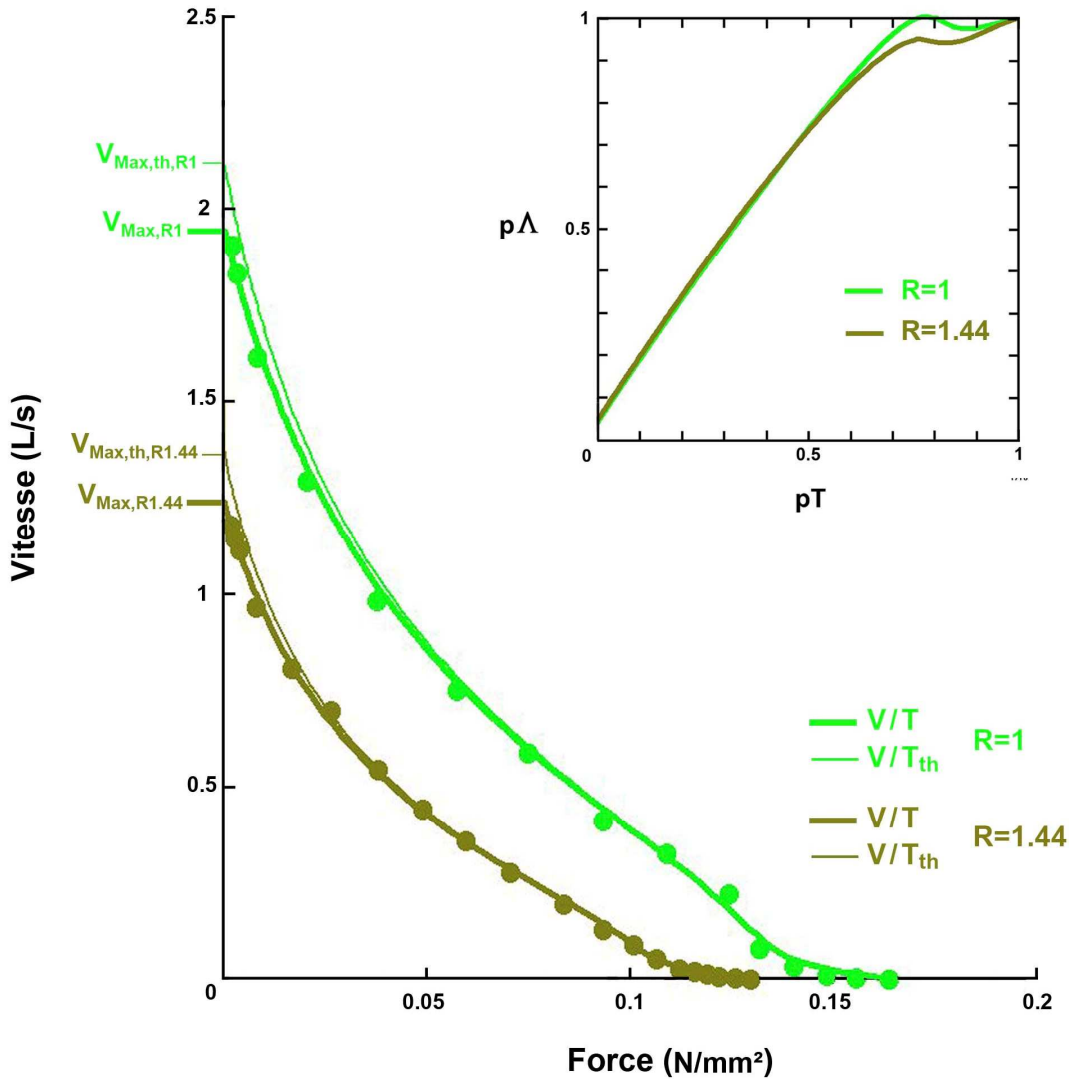


Fig FV3 : Relations Force-Vitesse en trait continu d'après les équations du modèle. Les points en vert et jaune foncé proviennent des Fig 4A et 4B dans (Edman 1988). En insert, la relation du nombre relatif de têtes en WS ($p\Lambda$) en fonction de la tension relative (pT).

Remarque

Pour 1 R (solution Ringer standard), les valeurs correspondent à la courbe de référence (voir Table FV1). Pour 1.44 R par rapport à 1 R , on observe une augmentation de l'étendue δX_T et des paramètres temporels, τ_{preSB} et τ_{SB} , τ_{preS} et τ_{startS} , τ_{preS} et τ_{startS} , τ_{preSB} et τ_{eSB} , se rapportant aux événements {SB}, {startS} et {startVS}. Il y a une diminution du nombre de têtes à même d'initier un WS, notamment rapidement : cela se traduit par une diminution de T_0 et de V_{Max} d'environ 20% et 35%, respectivement.

Le rétrécissement de l'espace inter-filamentaire accroît la résistance à l'écoulement ($\epsilon_{1.44R}=0.014 \text{ ms}\cdot\text{nm}^{-1}$). Cependant la vitesse maximale étant plus faible, l'influence de la viscosité reste minime pour 1.44 R .

Dans l'insert de la Fig 4, pour $pT < 80\%$, le tracé de $p\Lambda/pT$ se rapportant à 1.44 R se situe en dessous de celui relatif à 1 R ; l'explication provient de l'augmentation de δX_T .

Courbes FV4 d'après Fig 2 dans (Ford and others 1985)

But : comparer des expérimentations réalisées sur des fibres extraites du même muscle chez la même espèce d'animal par des équipes de recherche différentes

Table FV4 : Valeurs des paramètres

	Ford 1985 (expt: 15 nov / 5 dec 73)	Ford 1985 (expt : 23 oct 73)	Edman 1988 (REF)
Animal	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾
Muscle	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾
Γ	1°C	1°C	1°C
T0	295 kPa	285 kPa	163 kPa
L0	5.8 mm	5.8 mm	6.3 mm
N _{hs}	5500	5500	6000
L0 _s	2.2 μm	2.2 μm	2.1 μm
P _{startF}	0.61	0.58	0.6
P _{startS}	0.3	0.3	0.3
P _{startVS}	0.09	0.12	0.1
ε (ms·nm ⁻¹)	0.013	0.01	0.01
u _{Max,th} (nm·ms ⁻¹ par hs)	1.94	2.31	2.31
u _{Max} (nm·ms ⁻¹ par hs)	1.72	2.11	2.14
δX_{Max}	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm
δX_T	8 nm	8 nm	8 nm
δX_{pre}	6 nm	6 nm	6 nm
τ_{preSB}	3.1 ms	2.6 ms	2.6 ms
τ_{SB}	10 ms	7 ms	6 ms
τ_{startF}	0.7 ms	0.7 ms	0.7 ms
τ_{startS}	4.5 ms	3.5 ms	3.5 ms
τ_{startS}	28 ms	25 ms	25 ms
τ_{preVS}	90 ms	80 ms	80 ms
$\tau_{startVS}$	100 ms	90 ms	90 ms
τ_{preSDE}	5 ms	5 ms	5 ms
τ_{SDE}	18 ms	18 ms	18 ms
r ²	99.7%	99.8%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Temporaria* ⁽²⁾ *Muscle Tibialis Anterior*

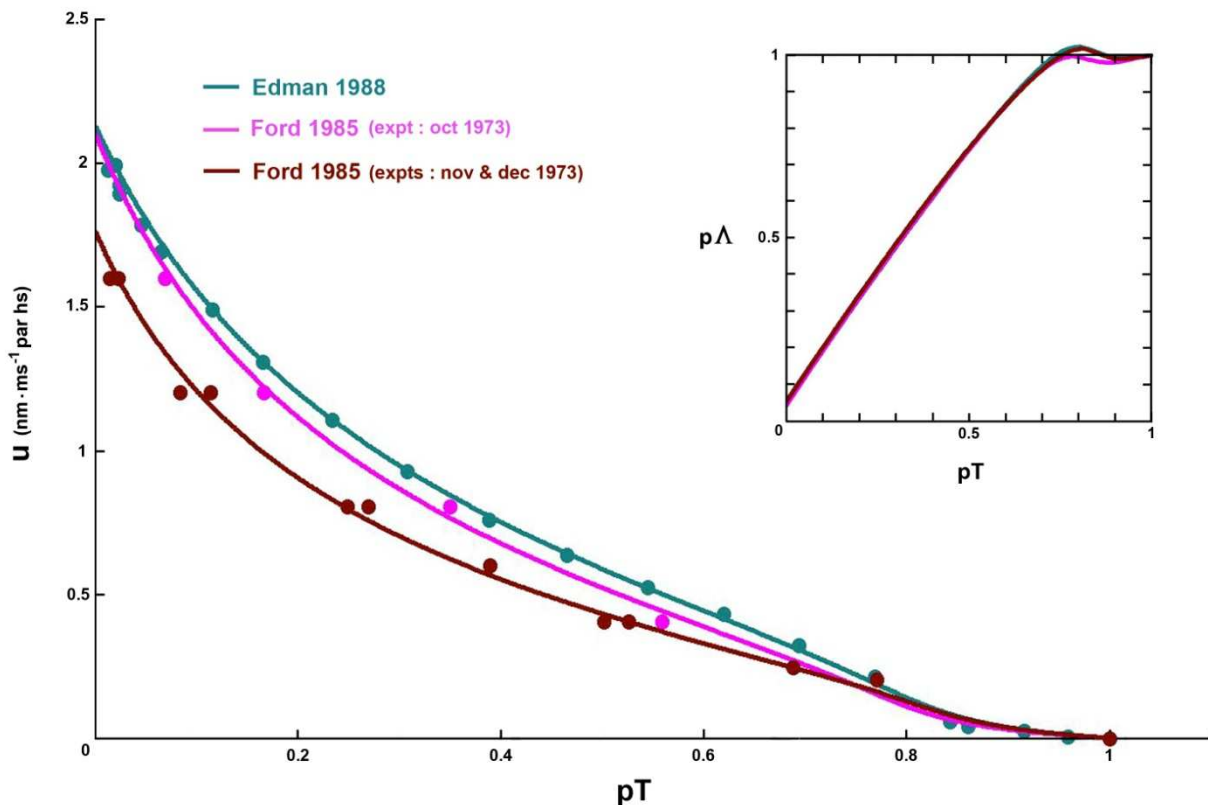


Fig FV4 : Relations Force-Vitesse en trait continu d'après les équations du modèles. Les points mauves et marrons proviennent de la Fig 3 dans (Ford and others 1985) et les points couleur bleu-vert de la Fig 2A dans (Edman 1988). En insert, la relation du nombre relatif de têtes en WS ($p\Lambda$) en fonction de la tension relative (pT).

Remarque

Concernant l'expérimentation intitulée « **oct 1973** » les valeurs correspondantes sont proches de celles données pour la **courbe de référence FV1** (voir données de la Table FV1).

Pour les expérimentations siglées « **nov et déc 73** », on note une augmentation caractéristique des coefficients temporels, τ_{preSB} et τ_{SB} , τ_{preS} et τ_{startS} , τ_{preS} et τ_{startS} , τ_{preSB} et τ_{eSB} , se rapportant aux évènements {SB}, {startS} et {startVS}.

Une augmentation du coefficient de viscosité est aussi marquée ($\varepsilon=0.013 \text{ ms}\cdot\text{nm}^{-1}$), valeur confirmée par les calculs explicités au Papier 4 à partir des Fig 5A et 5B dans (Ford and others 1985). Ces augmentations sont à rapprocher de celle du tracé relatif à 1.44R de la Fig FV3 : la possibilité d'une diminution de la distance inter-filamentaire relative à cette fibre est envisageable.

Courbes FV5 d'après Fig 3 dans (Edman and others 1976)

But : comparer des expérimentations réalisées sur des fibres extraites de même muscle avec une typologie différente

De manière rudimentaire, les fibres musculaires squelettiques sont classées en 3 types : fibre lente (type I) , fibre intermédiaire (type IIa) et fibre rapide (type IIb), associée chacune à un isoforme caractéristique de la chaîne lourde (*Heavy Chain*).

Table FV5 : Valeurs des paramètres

	fm I	fm IIa	fm IIb
Animal	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾
Muscle	MST ⁽²⁾	MST ⁽²⁾	MST ⁽²⁾
Γ	2°C	2°C	2.5°C
T0	184 kPa	250 kPa	300 kPa
L0	8.6 mm	11 mm	12.3 mm
N _{hs}	8400	10700	12000
L0 _s	2.1 μ m	2.1 μ m	2.1 μ m
P _{startF}	0.63	0.63	0.65
P _{startS}	0.33	0.33	0.32
P _{startVS}	0.04	0.04	0.03
ϵ (ms·nm ⁻¹)	0.016	0.016	0.016
u _{Max,th} (nm·ms ⁻¹ par hs)	2.85	3	3.5
u _{Max} (nm·ms ⁻¹ par hs)	1.95	2	2.45
δX_{Max}	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm
δX_T	8 nm	8 nm	8 nm
δX_{pre}	6 nm	6 nm	6 nm
τ_{preSB}	2.1 ms	2 ms	1.7 ms
τ_{SB}	19 ms	18 ms	10 ms
τ_{startF}	0.7 ms	0.7 ms	0.7 ms
τ_{startS}	3.5 ms	3.5 ms	3.5 ms
τ_{startS}	50 ms	35 ms	25 ms
τ_{preVS}	110 ms	100 ms	90 ms
$\tau_{startVS}$	110 ms	100 ms	90 ms
τ_{preSDE}	10 ms	7 ms	5 ms
τ_{SDE}	30 ms	20 ms	18 ms
r ²	99.9%	99.9%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Temporaria* ⁽²⁾ Muscle *SemiTendinosis*

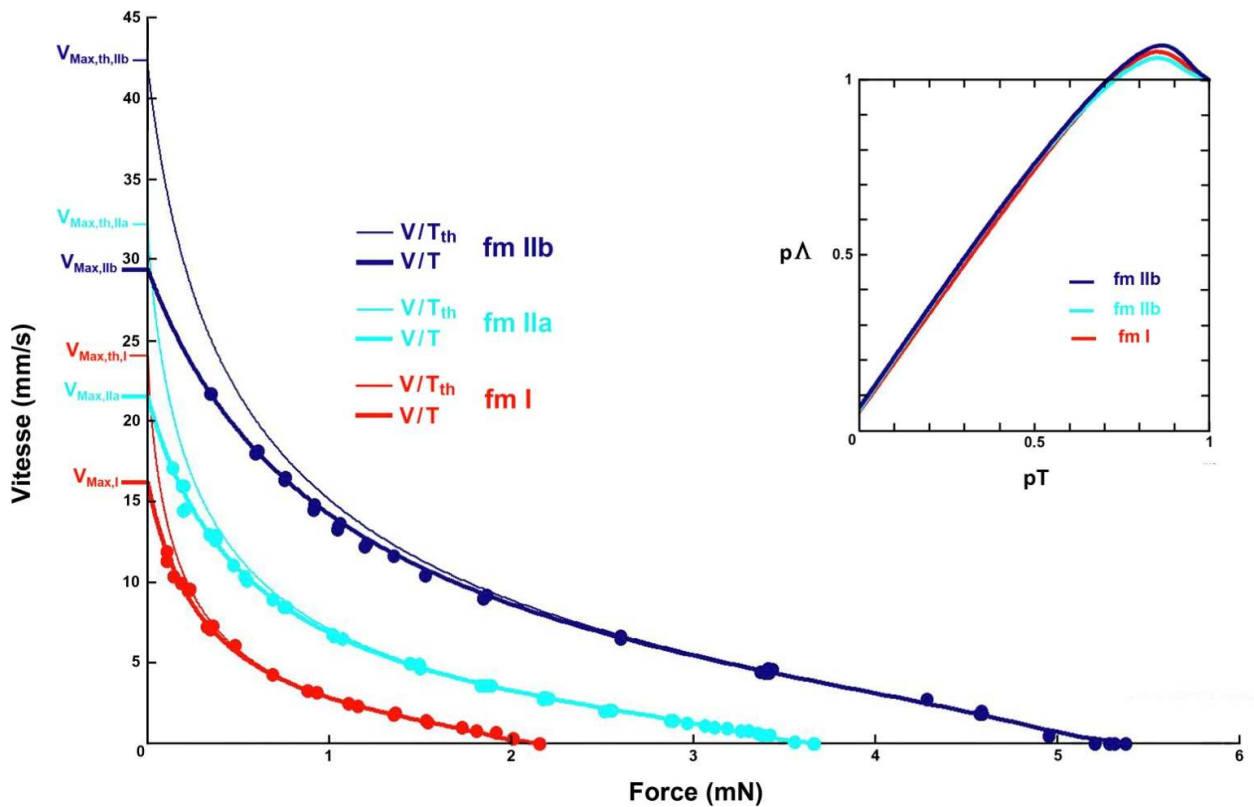


Fig FV5 : Relations Force-Vitesse avec la force (T en mN) et la vitesse ($|V|$ en mm/s) en trait continu bleu d'après les équations du modèles. Les points rouges, bleus ciel et bleus foncé proviennent de la Fig 3 dans (Edman and others 1976) relativement à 3 fibres classés en type I,IIa,et IIb, respectivement. En insert, la relation du nombre relatif de têtes en WS ($p\Lambda$) en fonction de la tension relative (pT).

Remarque

Un travail réalisé sur *le semi-tendinosus* de *Rana Temporaria* indique que 3 types de fibres sont présents dans ce muscle (Chayen and others 1987). D'après la longueur et la valeur de T_0 , nous avons classé les 3 fibres selon les 3 types classiques (I, IIa et IIb). Comme les fibres appartiennent au même muscle, nous supposons que la valeur de ε est commune aux 3 types de fibre (Table 4).

De manière caractéristique, les valeurs paramètres temporels, τ_{preSB} et τ_{SB} , τ_{preS} et τ_{startS} , τ_{preS} et τ_{startS} , τ_{preSB} et τ_{eSB} , se rapportant aux événements {SB}, {startS} et {startVS}, varient avec la typologie postulée tandis que les données géométriques intrinsèques des têtes de myosine δX_{Max} , δX_T , δX_{pre} sont identiques dans les 3 cas.

Lorsque l'on passe du type lent au type rapide, on note que τ_{preSB} diminue et conséquemment $u_{Max,th}$ augmente, que le nombre de hs s'accroît et accélère la hausse de $V_{Max,th}$ par le truchement de l'égalité (16b), que l'écart entre V_{Max} et $V_{Max,th}$ augmente, signalant ainsi le rôle de plus en plus influent joué par la viscosité, particulièrement pour les fibres rapides.

Dans l'insert de la Fig 4, aux tensions proches de $0.8 \cdot T_0$, le pic du nombre de têtes en WS est prononcé dans les trois cas à cause de la valeur élevée de p_{startF} . Les 3 tracés sont superposables et comparables à celui du graphique référent si $pT < 70\%$.

Courbe FV6 d'après Fig 2 dans (Edman and Hwang 1977)

But : comparer deux expérimentations réalisées sur des fibres extraites du même muscle chez la même espèce d'animal. Les deux fibres testées sont supposées être du même type.

Table FV6 : Valeurs des paramètres

	Edman 77	Edman 76 (fm IIa)
Animal	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾
Muscle	MST ⁽²⁾	MST ⁽²⁾
Γ	2°C	2°C
T0	230 kPa	250 kPa
L0	10.2 mm	11 mm
N_{hs}	9400	10700
$L0_s$	2.1 μm	2.1 μm
P_{startF}	0.6	0.63
P_{startS}	0.33	0.33
$P_{startVS}$	0.07	0.04
ε (ms·nm ⁻¹)	0.01	0.01
$u_{Max,th}$ (nm·ms ⁻¹ par hs)	3	2.5
u_{Max} (nm·ms ⁻¹ par hs)	2.24	2.02
δX_{Max}	11.5 nm	11.5 nm
δX_T	8 nm	8 nm
δX_{pre}	6 nm	6 nm
τ_{preSB}	2 ms	2.4 ms
τ_{SB}	16 ms	18 ms
τ_{startF}	0.7 ms	0.7 ms
τ_{startS}	3.5 ms	3.5 ms
τ_{startS}	26 ms	35 ms
τ_{preVS}	70 ms	70 ms
$\tau_{startVS}$	70 ms	80 ms
τ_{preSDE}	5 ms	7 ms
τ_{SDE}	18 ms	15 ms
r^2	99.9%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Temporaria* ⁽²⁾ Muscle *SemiTendinosis*

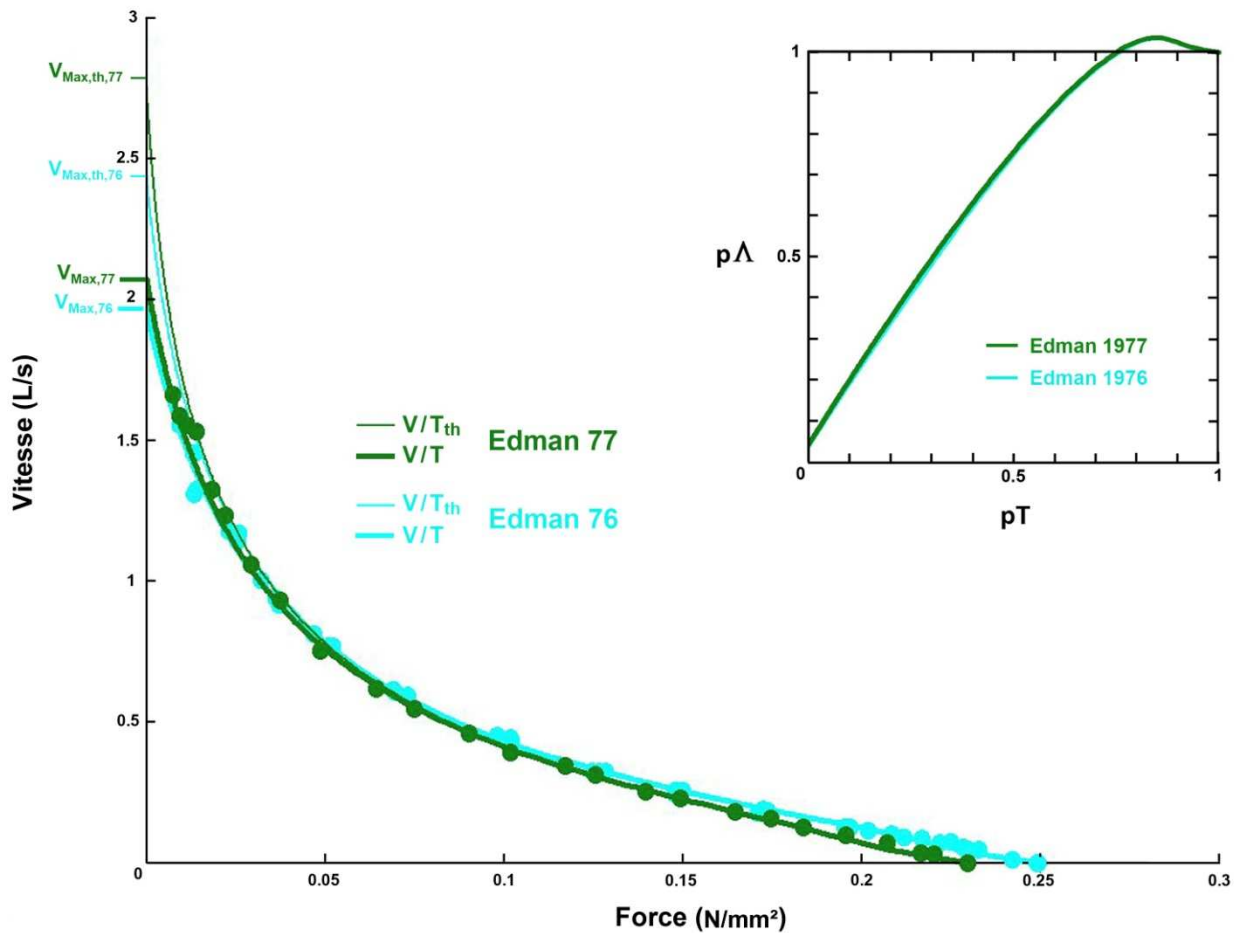


Fig FV6 : Relations Force-Vitesse en trait continu d'après les équations du modèle. Les points couleur vert foncé proviennent de la Fig 2 dans (Edman and Hwang 1977) et les points couleur bleu ciel de la Fig 2A dans (Edman and others 1976) pour la fibre de type IIa (longueur 11mm). En insert, la relation du nombre relatif de têtes en WS ($p\Lambda$) en fonction de la tension relative (pT).

Remarque

Selon (FV8), le paramètre τ_{preSB} influence significativement sur les valeurs des vitesses maximales théoriques $u_{Max,th}$ et $V_{Max,th}$. La présence de la viscosité aux vitesses élevées atténue l'écart pour les vitesses maximales observées u_{Max} et V_{Max} .

Courbes FV7 d'après Fig 3A dans (Piazzesi and others 2002) et Fig 2A dans (Edman and Hwang 1977)

But : comparer de 2 fibres extraites du même muscle chez 2 espèces différentes de grenouilles.

Table FV7 : Valeurs des paramètres

Animal	Rana E ⁽¹⁾	Rana T ⁽²⁾
Muscle	MTa ⁽³⁾	MTA ⁽³⁾
Γ	2°C	1°C
T0	155 kPa	163 kPa
L0	5 mm	6.3 mm
N_{hs}	4800	6000
$L0_s$	2.1 μm	2.1 μm
P_{startF}	0.63	0.6
P_{startS}	0.31	0.3
$P_{startVS}$	0.12	0.1
ϵ ($ms \cdot nm^{-1}$)	0.015	0.01
$u_{Max,th}$ ($nm \cdot ms^{-1}$ par hs)	2.4	2.31
u_{Max} ($nm \cdot ms^{-1}$ par hs)	2.13	2.14
δX_{Max}	11.5 nm	11.5 nm
δX_T	8 nm	8 nm
δX_{pre}	6 nm	6 nm
τ_{preSB}	2.5 ms	2.6 ms
τ_{SB}	6.5 ms	6 ms
τ_{startF}	0.7 ms	0.7 ms
τ_{startS}	3.5 ms	3.5 ms
τ_{startS}	25 ms	25 ms
τ_{preVS}	80 ms	80 ms
$\tau_{startVS}$	90 ms	90 ms
τ_{preSDE}	5 ms	5 ms
τ_{SDE}	18 ms	18 ms
r^2	99.8%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Esculenta* ⁽²⁾ *Rana Temporaria* ⁽³⁾ Muscle *Tibialis Anterior*

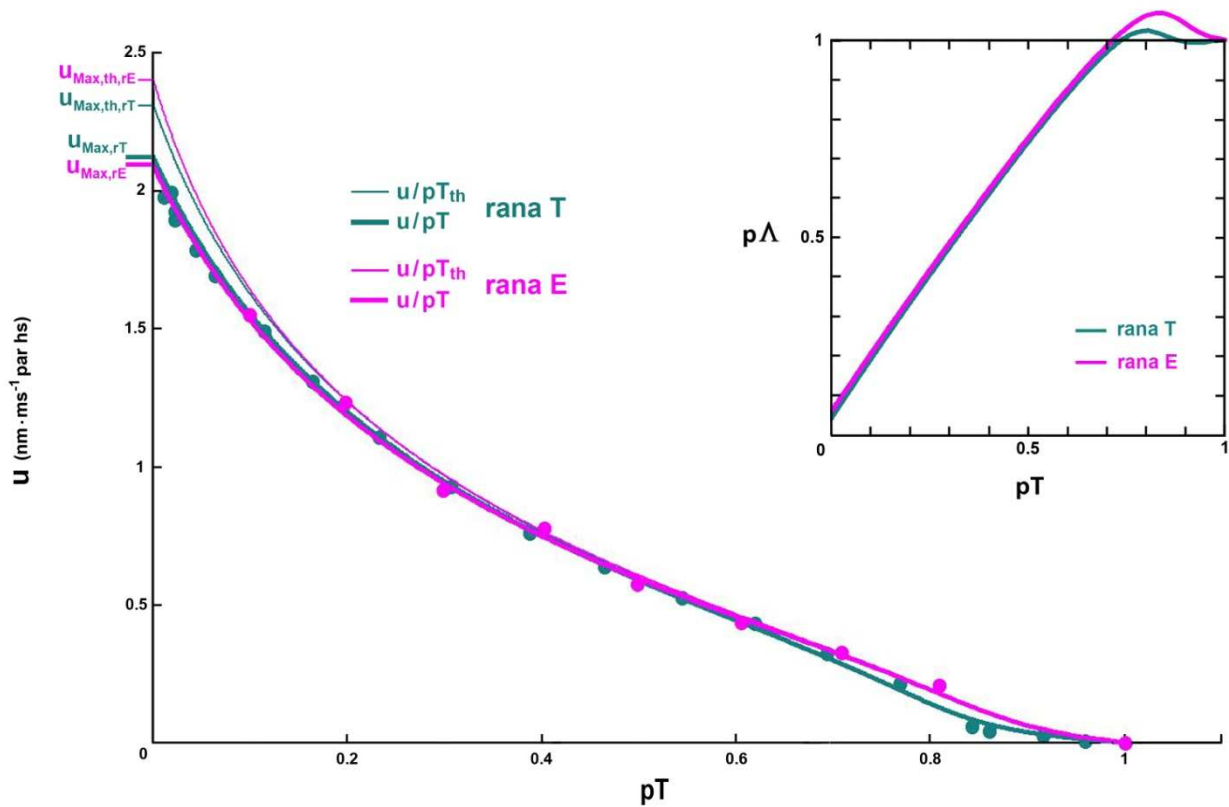


Fig FV7 : Relation Force-Vitesse avec la tension relative (pT) et la vitesse ($|u|$ en nm/ms par hs) en trait continu d'après les équations du modèle. Les points mauves proviennent de la Fig 3A dans (Piazzesi and others 2002) et les points bleu-vert de la Fig 2A dans (Edman 88). En insert, la relation du nombre relatif de têtes en WS ($p\Lambda$) en fonction de la tension relative (pT).

Remarque

Similitude des données et des tracés entre 2 fibres extraites du même muscle pour 2 espèces différentes de grenouille.

Dans l'insert, pour les tensions proches de $0.8 \cdot T_0$, le pic du nombre de têtes en WS est augmenté pour rana E par rapport à rana T, phénomène corrélé à la hausse de la valeur de P_{startF} comme déjà noté aux courbes FV2.

Courbes FV8 d'après Fig 5 dans (Edman 1988)

But : tester l'influence de la température interne de la fibre musculaire extraite du muscle *tibialis anterior* de *Rana Temporaria*

Table FV8 : Valeurs des paramètres

Γ	1.6°C	11° C
Animal	Rana T ⁽¹⁾	Rana T ⁽¹⁾
Muscle	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾
T0	137 kPa	163 kPa
L0	5.5 mm	5.5 mm
N _{hs}	6000	6000
L0 _s	2.1 μm	2.1 μm
P _{startF}	0.6	0.6
P _{startS}	0.28	0.3
P _{startVS}	0.12	0.1
ε (ms·nm ⁻¹)	0.012	0.06
u _{Max,th} (nm·ms ⁻¹)	2.31	5.45
u _{Max} (nm·ms ⁻¹)	1.97	4.25
δX _{Max}	11.5 nm	11.5 nm
δX _T	8 nm	8 nm
δX _{pre}	6 nm	6 nm
τ _{preSB}	2.6 ms	1.1 ms
τ _{SB}	12 ms	5.5 ms
τ _{startF}	0.7 ms	0.6 ms
τ _{preS}	3.5 ms	2
τ _{startS}	25 ms	11 ms
τ _{preVS}	90 ms	30 ms
τ _{startVS}	90 ms	50 ms
τ _{preSDE}	5 ms	3 ms
τ _{SDE}	18 ms	8 ms
r ²	99.9%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Temporaria* ⁽²⁾ Muscle *Tibialis Anterior*

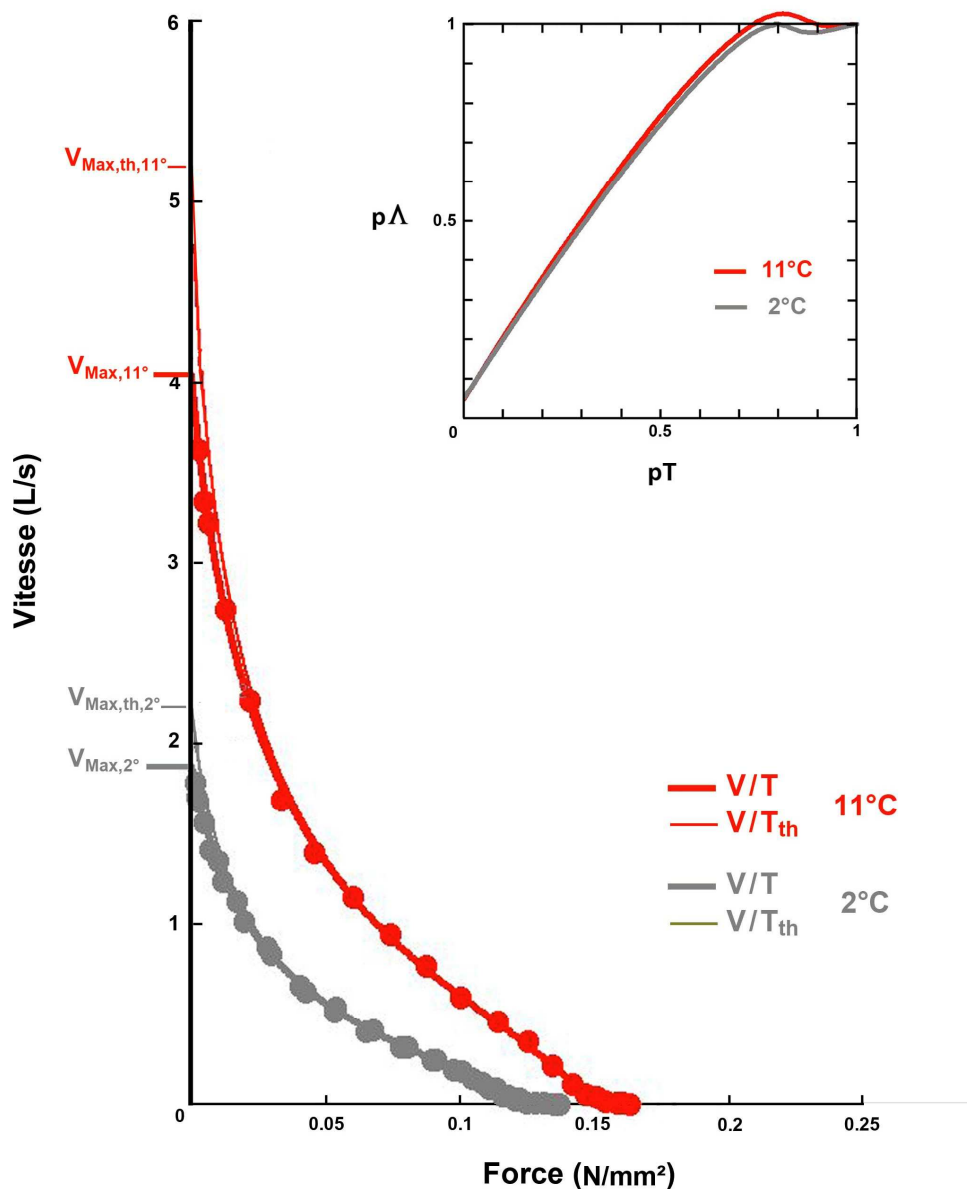


Fig FV8 : Relations Force-Vitesse en trait continu d'après les équations du modèle. Les points en gris et rouge proviennent de la Fig 5 dans (Edman 1988). En insert, la relation du nombre relatif de têtes en WS (Λ/Λ_0) en fonction de la tension relative (T/T_0).

Remarque

L'élévation de la température interne de la fibre musculaire de 1.6°C à 11°C provoque une augmentation de 20% de T_0 et une diminution de 50% en moyenne des paramètres temporels, à l'exception de τ_{startF} . La diminution pour moitié du coefficient ϵ , valeur donnée empiriquement, n'empêche pas une influence marquée de la viscosité entre vitesses maximales théorique et observée à 11°C.

Courbes FV9 d'après Fig 3A dans (Piazzesi and others 2002) et Fig 5 dans (Elangovan and others 2012)

But : tester l'influence de la température interne de la fibre musculaire extraite du muscle *tibialis anterior* de *Rana Esculenta*

Table FV9 : Valeurs des paramètres

Γ	2°C (Piazzesi)	7°C (Elangovan)	15°C (Elangovan)	21°C (Elangovan)
Animal	Rana E ⁽¹⁾	Rana E ⁽¹⁾	Rana E ⁽¹⁾	Rana E ⁽¹⁾
Muscle	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾	MTA ⁽²⁾
T0	155 kPa	195 kPa	230 kPa	241 kPa
L0	5 mm	6 mm	6 mm	6 mm
N _{hs}	4800	5700	5700	5700
L0 _s	2.1 μm	2.11 μm	2.11 μm	2.11 μm
P _{startF}	0.63	0.6	0.65	0.64
P _{startS}	0.31	0.32	0.3	0.3
P _{startVS}	0.06	0.08	0.05	0.06
ε (ms·nm ⁻¹)	0.015	0.009	0.004	0.002
u _{Max,th} (nm·ms ⁻¹ par hs)	2.4	4.3	10	17.15
u _{Max} (nm·ms ⁻¹ par hs)	2.1	3.4	7.85	13.05
δX _{Max}	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm
δX _T	8 nm	8 nm	8 nm	8 nm
δX _{pre}	6 nm	6 nm	6 nm	6 nm
τ _{preSB}	2.5 ms	1.4 ms	0.6 ms	0.35 ms
τ _{SB}	6.5 ms	4.5 ms	1.6 ms	1 ms
τ _{startF}	0.8 ms	0.7 ms	0.7 ms	0.6 ms
τ _{preS}	3.5 ms	3	2 ms	1
τ _{startS}	25 ms	11 ms	6 ms	3.5ms
τ _{preVS}	80 ms	60 ms	40 ms	30 ms
τ _{startVS}	90 ms	70 ms	40 ms	30 ms
τ _{preSDE}	5 ms	4 ms	2.5 ms	2 ms
τ _{SDE}	18 ms	14 ms	11 ms	7 ms
R ²	99.8%	99.8%	99.8%	99.9%

⁽¹⁾ *Rana Temporaria* ⁽²⁾ Muscle *Tibialis Anterior*

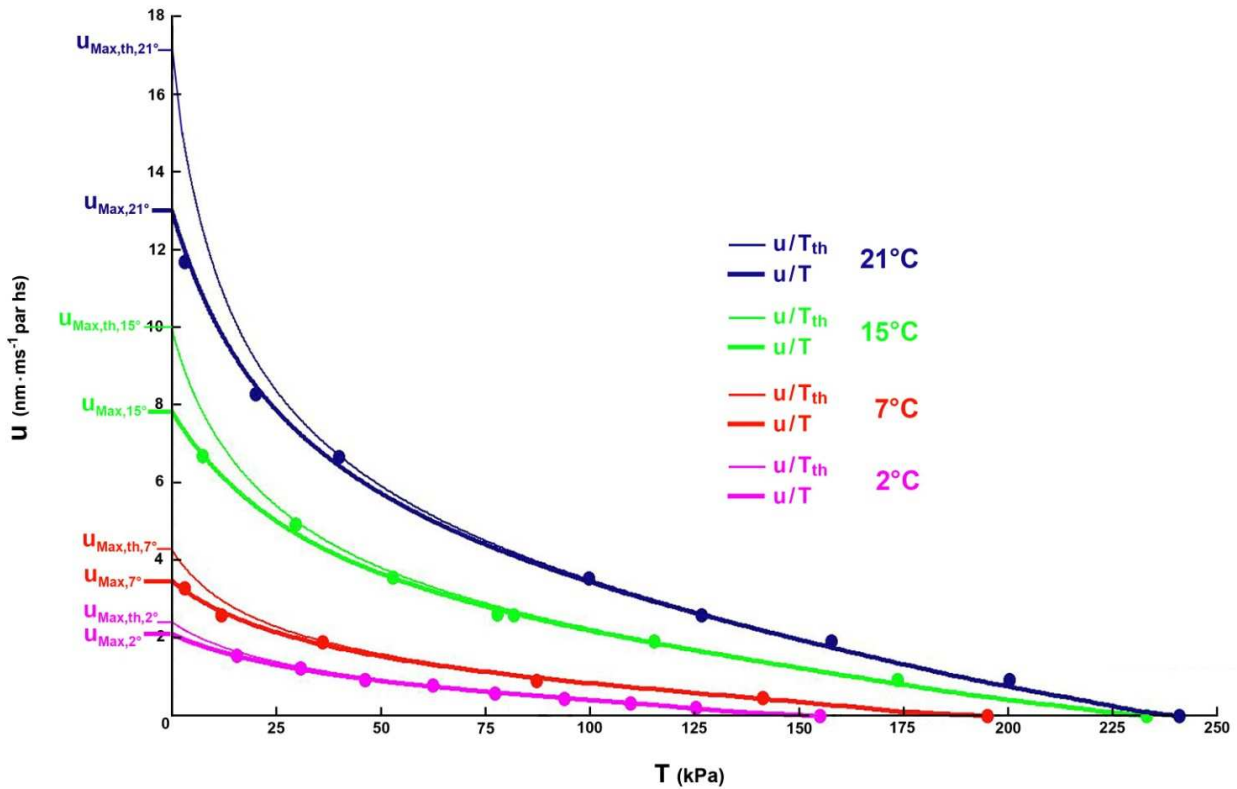


Fig FV9 : Relation Force-Vitesse en trait continu d'après les équations du modèle. Les points mauves proviennent de la Fig 3A dans (Piazzesi and others 2002) et les points rouges, verts et bleus de la Fig 5 dans (Elangovan and others 2012).

Remarque

L'augmentation de la température interne de la fibre musculaire provoque une augmentation de T_0 et une diminution des paramètres temporels.

Lorsque la température s'élève, l'écart entre V_{Max} et $V_{Max,th}$ augmente, affirmant l'importance de la viscosité aux vitesses élevées même pour de faibles valeurs de ϵ .

Courbes FV10 d'après Fig 3A et 3B dans (Ranatunga 1984)

But : tester l'influence conjuguée de la typologie et de la température sur 2 fibres musculaires extraites de l'*extensor digitorum longus* (muscle rapide) et du *soleus* (muscle lent) chez le rat

Table FV10 : Valeurs des paramètres

Γ	EDL			SOL		
	15 °C	25 °C	35 °C	15 °C	25 °C	35 °C
T0	165 kPa	198 kPa	209 kPa	158 kPa	188 kPa	198 kPa
L0	15.6 mm	15.6 mm	15.6 mm	17.6 mm	17.6 mm	17.6 mm
N _{hs}	12500	12500	12500	4800	4800	4800
L0 _s	2.1 μm	2.1 μm	2.1 μm	2.1 μm	2.1 μm	2.1 μm
P _{startF}	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
P _{startS}	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
P _{startVS}	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ε (ms·nm ⁻¹)	0.003	0.001	0	0.003	0.001	0
u _{Max,th} (nm·ms ⁻¹)	6	12	15	2	4.29	10
u _{Max} (nm·ms ⁻¹)	4.65	10.35	15	1.68	4.1	10
δX_{Max}	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm	11.5 nm
δX_T	8 nm	8 nm	8 nm	8 nm	8 nm	8 nm
δX_{pre}	6 nm	6 nm	6 nm	6 nm	6 nm	6 nm
τ_{preSB}	1 ms	0.5 ms	0.4 ms	3 ms	1.4 ms	0.6 ms
τ_{SB}	8 ms	1.9 ms	0.7 ms	30 ms	6.2 ms	1.9 ms
τ_{startF}	0.7 ms	0.7 ms	0.7 ms	4 ms	1 ms	0.8 ms
τ_{preS}	15 ms	3 ms	1 ms	30 ms	8 ms	4 ms
τ_{startS}	30 ms	27 ms	10ms	80 ms	40 ms	16 ms
τ_{preVS}	70 ms	40 ms	20 ms	100 ms	50 ms	40 ms
$\tau_{startVS}$	80 ms	60 ms	20 ms	150 ms	70 ms	60 ms
τ_{preSDE}	8 ms	4 ms	1 ms	10 ms	5 ms	3 ms
τ_{SDE}	25 ms	7 ms	5 ms	30 ms	20 ms	8 ms
r ²	99.8%	99.9%	99.9%	99.8%	99.9%	99.9%

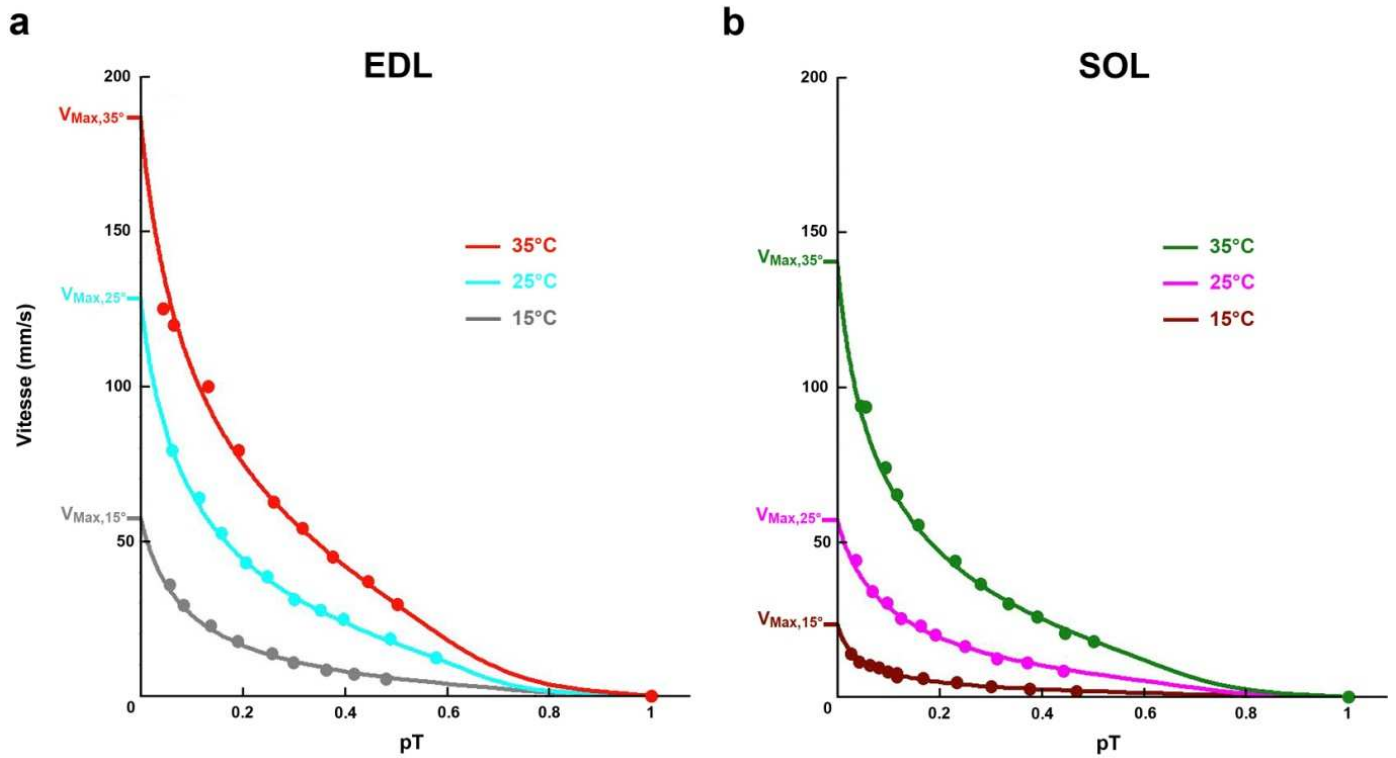


Fig 4 : (a) et (b) Relations Force-Vitesse en trait continu d'après l'équation (FV5) pour deux fibres, l'une extraite d'un muscle rapide (EDL) et l'autre d'un muscle lent (SOL) testées à 3 températures différentes, 15, 25 et 35°C.

Les points présents proviennent des Fig 3A et 3B dans (Ranatunga 1984).

Remarque

Les données se rapportant au sarcomère et aux critères géométriques de la tête de myosine sont identiques pour les 2 fibres.

Seules diffèrent les constantes de temps comme déjà vu pour courbe FV8 et FV9. Les valeurs se rapportant aux fibres rapides (EDL) sont toutes comparativement inférieures à celles relatives aux fibres lentes (SOL).

Références

- Chayen N, Freundlich A, Squire JM. 1987.** Comparative histochemistry of a flatfish fin muscle and of other vertebrate muscles used for ultrastructural studies. *J Muscle Res Cell Motil* 8(4):358-71.
- Edman KA. 1988.** Double-hyperbolic force-velocity relation in frog muscle fibres. *J Physiol* 404:301-21.
- Edman KA, Hwang JC. 1977.** The force-velocity relationship in vertebrate muscle fibres at varied tonicity of the extracellular medium. *J Physiol* 269(2):255-72.
- Edman KA, Mulieri LA, Scubon-Mulieri B. 1976.** Non-hyperbolic force-velocity relationship in single muscle fibres. *Acta Physiol Scand* 98(2):143-56.
- Elangovan R, Capitanio M, Melli L, Pavone FS, Lombardi V, Piazzesi G. 2012.** An integrated in vitro and in situ study of kinetics of myosin II from frog skeletal muscle. *J Physiol* 590(Pt 5):1227-42.
- Ford LE, Huxley AF, Simmons RM. 1985.** Tension transients during steady shortening of frog muscle fibres. *J Physiol* 361:131-50.
- Gordon AM, Huxley AF, Julian FJ. 1966.** The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres. *J Physiol* 184(1):170-92.
- Louvet S. 2018.** Modèle mécanique de la contraction musculaire. 1. Relation force-vitesse. hal-01965922 (v1) : HAL.
- Piazzesi G, Lucii L, Lombardi V. 2002.** The size and the speed of the working stroke of muscle myosin and its dependence on the force. *J Physiol* 545(Pt 1):145-51.
- Ranatunga KW. 1984.** The force-velocity relation of rat fast- and slow-twitch muscles examined at different temperatures. *J Physiol* 351:517-29.