

Variation des pressions sous bandages : modélisation sur cylindre



Pressure change under bandages: Modelling on cylinders

Jean-Claude Ferrandez^a
Pierre-Henri Ganchou^b
Serge Theys^c

^aConsultation de lymphologie, institut Sainte-Catherine, 250, chemin de Baigne-Pieds, CS 80005, 84918 Avignon cedex 9, France

^b35, bis rue Georges-Mederic, 94700 Maisons-Alfort, France

^cHaute école Louvain-en-Hainaut, Montignies/Sambre, Belgique

Reçu le 6 juin 2017 ; reçu sous la forme révisée le 22 mars 2018 ; accepté le 24 avril 2018

RÉSUMÉ

Introduction. – La pression d'un bandage est régie par la loi de Laplace.

Objectif. – Mesurer la pression des bandes sur des cylindres et les comparer aux valeurs théoriques.

Méthode. – Des capteurs sont installés sur différents cylindres. Ils sont recouverts de trois couches de bande à allongement long superposées en spirale ou à deux couches de bande inélastique. Une couche de mousse de densité variable recouvre un cylindre. Les pressions mesurées ont été comparées à celles théoriques quand les bandes se superposent en circulaire et à celles théoriques prenant en compte l'inclinaison de la montée en spirale.

Résultats. – Les pressions mesurées sont inférieures aux valeurs théoriques. Les bandes inélastiques appliquent une pression supérieure que celles à allongement long. Une bande coton ou de mousse modifie la pression. Une partie de la pression est absorbée par la mousse.

Conclusion. – Des différences entre les pressions mesurées et théorique sont observées.

Niveau de preuve. – Non adapté.

© 2018 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

SUMMARY

Introduction. – Bandage pressure is determined by Laplace's law.

Aim. – To measure bandage pressure on cylinders, and compare it versus theoretic values.

Methods. – Receptors were placed on a number of cylinders. These were covered by 3 spiralling layers of long-stretch bandages, with or without 2 layers of inelastic bandage. A foam layer of varying density covered the cylinder. Manometric pressures (P_{man}) were compared to theoretic values for circularly overlaid bandages (P_{cyl}) and to theoretic values taking account of the spiral slope (P_{incl}).

Results. – P_{man} was lower than the theoretic value. Inelastic bandages showed higher P_{man} values than the long-stretch elastic bandages. A cotton or foam layer changed P_{man} , as did foam density. Pressure on the foam was not transmitted all the way through the foam.

Conclusion. – Manometric and theoretic pressure values showed certain differences.

Level of evidence. – Non available.

© 2018 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

MOTS CLÉS

Bandages
Œdèmes
Loi de Laplace
Pression
Rayon de courbure

KEYWORDS

Bandages
Edema
Laplace's law
Pressure
Curvature radius

Auteur correspondant :

J.-C. Ferrandez,
Consultation de lymphologie,
institut Sainte-Catherine, 250,
chemin de Baigne-Pieds, CS
80005, 84918 Avignon cedex 9,
France.
Adresse e-mail :
jc.ferrandez@wanadoo.fr

INTRODUCTION

La compression par bandage et par bas/manchon constitue le pilier central du traitement des pathologies de la circulation de retour [1–3]. Son objectif est de réduire un excédent de volume (sang, lymphe, liquide interstitiel). Pour y parvenir, la compression doit exercer une pression. Celle-ci doit être adaptée à la nature et à l'importance du déficit.

Pour les bas médicaux, des tables synthétiques de pression ont été établies [4,5]. La liste des produits et prestations remboursables (LPPR) distingue quatre classes [6]. Elles fixent la valeur à exercer au niveau supra-malléolaire, défini comme niveau B par les filatures. Le calcul de la valeur de la compression se rapporte à la loi attribuée à Laplace (formule1) [7,8].

$$\text{Pression(mm Hg)} = 4620(\text{Constante}) \times \frac{\text{Tension(KgF)} \times \text{nombre de couches}}{\text{Circonf(cm)} \times \text{largeur de la bande(cm)}} \quad (1)$$

La morphologie des contours du membre au niveau du point B fait apparaître des courbures différentes. La particularité de la formule de Laplace est de s'appliquer à une circonférence qui n'est, en réalité, qu'un périmètre. Pour calculer la pression appliquée en un point donné, il convient d'utiliser la pression de Laplace (formule2) [4,9,10].

$$\text{Pression} = \frac{\text{Tension(Kgf)} \times \text{nombre de couches}}{\text{r de courbure}} \quad (2)$$

Avec cette formule, la pression n'est plus liée à une circonférence-plan ou à un rayon géométrique moyen mais est inversement proportionnelle au rayon de courbure local.

Ainsi, au niveau B, selon le secteur considéré de la jambe (latéral, médial, antérieur ou postérieur) le rayon de courbure peut varier de 1 à 3. La valeur théorique de la pression appliquée par un bas varie dans les mêmes proportions (Fig. 1).

D'autre part lorsque la compression n'est pas réalisée par bas mais par bandages, pour calculer la pression, il convient de tenir compte de la modification réel du rayon de courbure qui est lié à l'inclinaison de la pose de la bande en spirale.

Les bandes ne sont pas posées en circulaire.

Le but de cette étude préliminaire était de chercher à vérifier :

- la proportionnalité des pressions exercées en fonctions du nombre de couches;
- les différences si elles existent, entre la pression exercée en superficie ou en profondeur par deux bandes à propriété d'allongement différent et les pressions théoriques ainsi que l'impact des corrections liées au montage en spirale. Cette recherche se fait soit sur des cylindres durs ou sur des cylindres recouverts par une interface de mousse de différente densité. Cette approche expérimentale se propose d'étudier les pressions appliquées par les bandages sur des cylindres de différents diamètres faisant le parallèle avec les membres humains aux consistances différentes.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les supports utilisés étaient quatre cylindres solides mesurant respectivement 5, 4, 3 et 2,5 cm de rayon (r_{cy}) (Fig. 2).

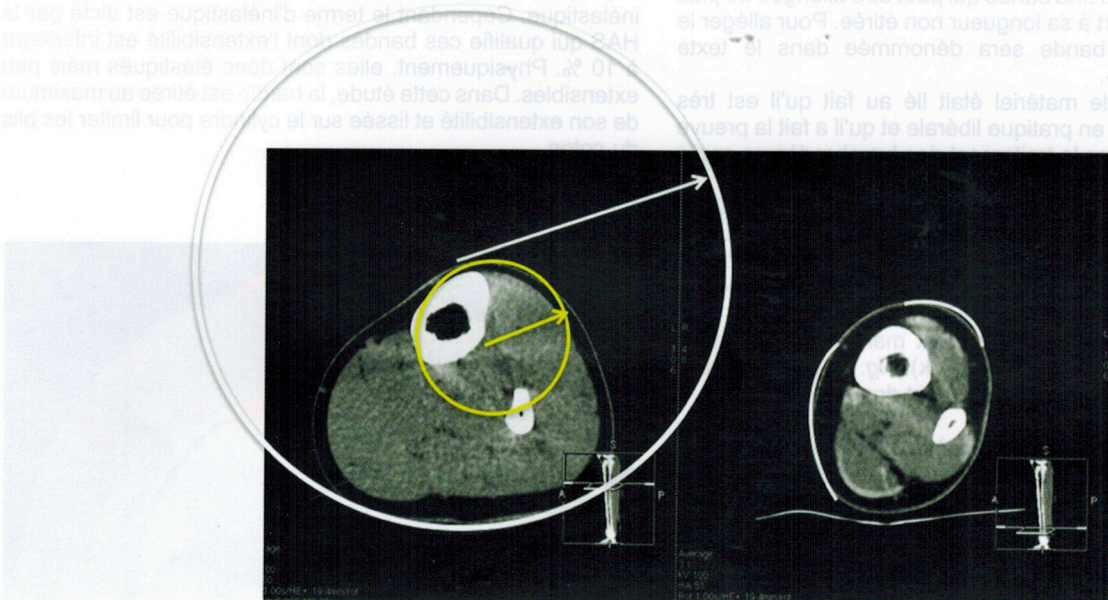


Figure 1. Le rayon de courbure symbolisé sur cette coupe scanner montre qu'à une même distance du pied, le rayon de courbure de la jambe peut varier de 1 à 3. Ainsi, selon la formule de la pression de Laplace, la pression théorique appliquée par une bande varie dans les mêmes proportions.

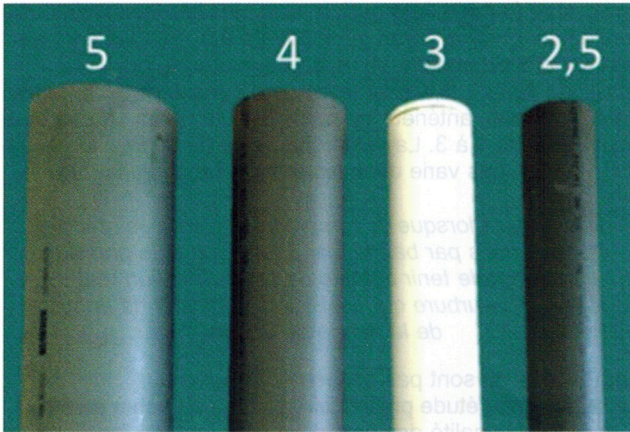


Figure 2. Le matériel sur lequel les mesures de pression ont été réalisées est composé de quatre cylindres solides de 5, 4, 3 et 2,5 cm de rayon plan géométrique.

Le cylindre de 5 cm r_{cyl} est un PVC compact EU M1 DN 100 ; celui de 4 cm r_{cyl} , un Martens Ecomar. 46/01 PVC 4 DN 80 ; celui de 3 cm r_{cyl} , un pied métallique de plan de travail ; le 2,5 cm r_{cyl} , un PVC compact EU M1 DN 50.

La pression était exercée par deux types de bande. L'une est en coton, qualifiée administrativement d'inélastique (normes NF EN 14 704-1) (Bande coton short stretch ThuasneTM, France). L'inélasticité est la caractéristique normée par la HAS d'une bande qui ne peut pas être allongée de plus de 10 % de sa longueur. Pour alléger le vocabulaire de l'article, cette bande sera dénommée « Bande coton ».

L'autre est une bande qualifiée administrativement « à allongement long », (Biflex[®] « + étalonnée » n°16, 10 cm de large, ThuasneTM, France). L'allongement long est la caractéristique normée par la HAS d'une bande qui peut être allongée de plus de 100 % par rapport à sa longueur non étirée. Pour alléger le vocabulaire, cette bande sera dénommée dans le texte « bande élastique ».

Le choix du type de matériel était lié au fait qu'il est très fréquemment utilisé en pratique libérale et qu'il a fait la preuve de son efficacité dans le traitement des lymphœdèmes après cancer du sein [11].

L'interface utilisée était une mousse polyuréthane de 2 cm d'épaisseur. Deux types de mousse de densité ont été testées : l'une peu compressible (MorelTM 43 kg/m³) qualifiée de dure ; l'autre plus compressible (MorelTM 26 kg/m³) qualifiée de molle.

La pression était quantifiée par deux manomètres portatifs, des Kikuhime[®] (TT MediTM, Danemark) (Fig. 3). Leur fiabilité et leur reproductibilité sont très largement documentées dans la bibliographie [12,13].

Avant emploi, ils ont été étalonnés à la pression ambiante. Ils ont également été testés en posant leur pastille sur un plan dur et en appliquant différents poids calibrés. L'unité de pression est le millimètre de mercure (mm Hg).

Un seul capteur a été utilisé lors des tests où les bandes étaient enroulées autour des cylindres ; les deux ont été utilisés quand une couche de mousse était interposée. Dans ce cas, les deux pastilles étaient placées de part et d'autre de la mousse, en regard l'une de l'autre (Fig. 4). La pression mesurée à la surface externe de la mousse a été qualifiée



Figure 3. Boîtier à lecture digitale (Kikuhime[®]) raccordé à la pastille manométrique (3,2 × 4,0 × 0,3 cm de petit rayon, de grand rayon et d'épaisseur)(100 mm²) dont la base est fixée sur un cylindre par du papier collant.

de corticale (c_{ort}) ; celle sous la mousse de sous-corticale (ss_{-cort}).

Chaque bandage a été réalisé cinq fois par un seul expérimentateur expert. Sur les cinq mesures, la pression moyenne a été retenue. La pose de la bande à allongement long a respecté la recommandation du fabricant : le petit côté du rectangle imprimé a été allongé jusqu'à représenter un carré. Cette recommandation assure une régularité de tension. De la sorte, la tension de pose a été de 30 % de l'allongement maximum. À l'aide d'une toise romaine à ressort calibré, la tension était alors proche de 840 grF. Pour la pose de la bande de coton, celle-ci a été appliquée en deux couches, avec la technique du « tendu-lissé ». La dénomination de cette technique peut paraître paradoxale puisque étirant une bande dite inélastique. Cependant le terme d'inélastique est dicté par la HAS qui qualifie ces bandes dont l'extensibilité est inférieure à 10 %. Physiquement, elles sont donc élastiques mais peu extensibles. Dans cette étude, la bande est étirée au maximum de son extensibilité et lissée sur le cylindre pour limiter les plis du coton.

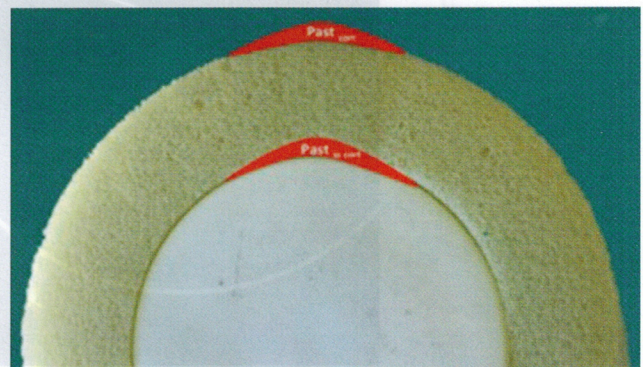


Figure 4. Quand la mousse est interposée entre la bande et le cylindre, une pastille manométrique est posée par-dessus, l'autre, par-dessous.

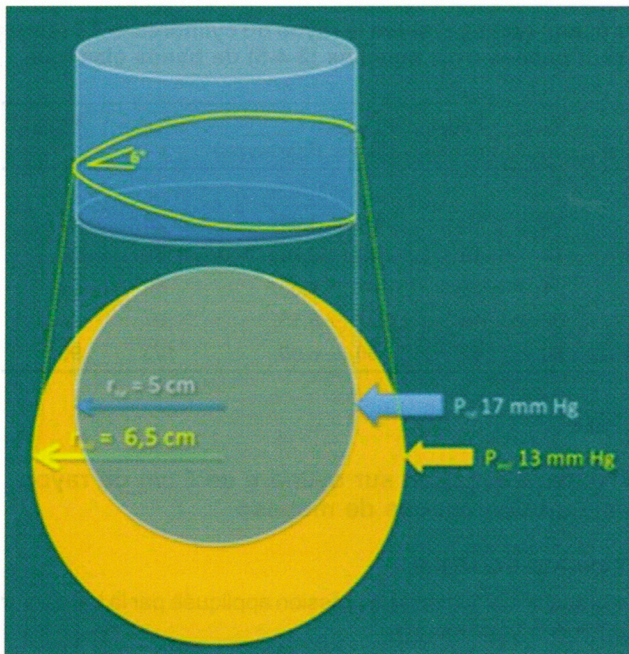


Figure 5. Le bandage à allongement moyen est posé avec une inclinaison de 6° sur un cylindre de 5 cm de r_{cyl} . Cette inclinaison augmente le rayon de courbure (r_{incl}) à 6,5 cm. La valeur de compression diminue de 23,5 % et passe de 17 (P_{5cyl}) à 13 mm Hg (P_{5incl}).

Sur chacun des cylindres, les spirales suivent une inclinaison respective de 6-8-9-10° (Fig. 5) afin que le recouvrement s'effectue par 1/3 et obtienne trois couches sur la pastille. Cette inclinaison (i_{incl}) associée à l'étirement de 30 % augmente la circonférence des cylindres à 40, 83-32, 67-24, 505-20, 42 cm et leur r_{courb} à 6, 53-5, 25-3, 95-3, 31 cm. Ces corrections de r_{courb} sont prises afin de calculer les P_{incl} alors que les r_{cyl} cylindriques, majorés de 1 mm par l'épaisseur de la couche de tissu, vont servir de base pour fixer les P_{cyl} . L'étude a suivi trois protocoles. La première expérimentation a consisté à poser trois couches de la bande élastique ; la seconde, à interposer deux couches de la bande coton, avant l'application des bandes élastiques. Ces deux expérimentations ont été réalisées successivement sur les cylindres de 5, 4 et 2,5 cm r_{courb} . La troisième expérimentation interpose sous les cinq couches précédentes de bande, une couche de 2 cm de mousse sur le cylindre de 3 cm r_{courb} ; ce qui donne un rayon brut de 5 cm r_{courb} .

RÉSULTATS

1^{re} expérimentation : bande élastiques sur cylindres durs

La première spirale de la bande élastique (couche¹) exerce une pression manométrique (P_{man}) qui augmente quand le rayon du cylindre (r_{cyl}) diminue. La pression enregistrée sur le cylindre de 5 cm de rayon ($P_{5}^1_{man}$) est mesurée à 16,8 mm Hg ; celle sur le cylindre de 4 cm ($P_{4}^1_{man}$), à 19,2 mm Hg et celle sur le cylindre de 2,5 cm ($P_{2,5}^1_{man}$), à 22,8 mm Hg (Tableau I).

Sur le cylindre 5 la pression a augmenté successivement de 16,8 à 28,6 puis à 39,4 mm Hg (σ : écart type correspondant 0,45-0,89-1,95). Sur le cylindre 4 cm, elle est passée successivement de 19,2 à 32 puis 43,4 mm Hg ($\pm 2,17$ -0,71-1,82). Sur le cylindre 2,5 cm, elle est passée successivement de 22,8 à 38,8 et 53,4 mm Hg ($\pm 3,27$ -3,11-7,89). Chaque couche supplémentaire de bande élastique augmentait la pression sur le cylindre.

La $P_{5}^1_{man}$ équivaut à la valeur $P_{5}^1_{cyl}$ obtenue par la formule 2. C'est là, la seule équivalence. Toutes les autres valeurs manométriques suivent soit une progression inférieure à la pression attendue qui serait exercée sur le plan du cylindre P_{cyl} ; soit, supérieure à la pression (P_{incl}) qui serait exercée sur le rayon de courbure corrigé par l'inclinaison des spirales. L'ajout d'une deuxième puis d'une troisième couche en spirale augmentait la pression mais ni la doublait ni la triplait.

Quand le montage des trois couches est terminé (couche 3), la pression manométrique (P_{man}) relevée sur les trois cylindres ($P_{5}^3_{man}$ - $P_{4}^3_{man}$ - $P_{2,5}^3_{man}$) était de 39,4-43,4-53,4 mm Hg. Ces valeurs sont inférieures à celles des pressions théoriques de cylindre $P_{5}^3_{cyl}$ - $P_{4}^3_{cyl}$ - $P_{2,5}^3_{cyl}$: 48-60-93 mm Hg. En revanche, elles sont assez proches de celles des pressions d'inclinaison $P_{5}^3_{incl}$ - $P_{4}^3_{incl}$ - $P_{2,5}^3_{incl}$: 37-40-37 mm Hg. Les écarts types de ces différences sont faibles hormis pour le cylindre de 2,5 cm.

2^e expérimentation : 2 couches d'une bande coton recouvertes par une bande élastique

Quand le montage débute par deux couches de bande coton, les valeurs de pression sous ces deux couches était supérieures à celles enregistrées avec l'application exclusive d'une bande élastique (Tableau II).

Sur le cylindre 5 cm, les deux couches de la bande coton appliquaient 20,8 et 39,2 mm Hg ($\pm 2,77$ -1,64) alors que celles de la bande élastique appliquaient 16,8 et 28,6 mm Hg. Leurs écarts types sont faibles ($\pm 0,45$ -0,89). Pour le

Tableau I. Valeurs des pressions moyennes P (mmHg) et leurs écarts types (\pm) selon le rayon du cylindre 5-4-2,5 (cm) sous 1-2-3 couche(s) de bande élastiques comparées aux valeurs théoriques des P_{cyl} et P_{incl} .

P (mmHg)	P_{5man} (Moy \pm Écart-type)	P_{5cyl}	P_{5incl}	P_{4man} (Moy \pm Écart-type)	P_{4cyl}	P_{4incl}	$P_{2,5man}$ (Moy \pm Écart-type)	$P_{2,5cyl}$	$P_{2,5incl}$
Couche									
1	16,8 ($\pm 0,45$)	17	13	19,2 ($\pm 2,17$)	21	16	22,8 ($\pm 3,27$)	34	13
2	28,6 ($\pm 0,89$)	33	25	32 ($\pm 0,71$)	41	31	38,8 ($\pm 3,11$)	65	25
3	39,4 ($\pm 1,95$)	48	37	43,4 ($\pm 1,82$)	60	40	53,4 ($\pm 7,89$)	93	37

Tableau II. Valeurs des pressions moyennes P (mmHg) et leurs écarts types (\pm) selon le rayon du cylindre 5-4-2,5 (cm) sous 1-2 couche(s) de bande coton par-dessus lesquelles sont posées trois couches (3-4-5) de bande élastique, comparées aux valeurs théoriques des P_{cyl} et P_{incl} .

P(mmHg)	P_{5man} (Moy \pm Écart-type)	P_{5cyl}	P_{5incl}	P_{4man} (Moy \pm Écart-type)	P_{4cyl}	P_{4incl}	$P_{2,5man}$ (Moy \pm Écart-type)	$P_{2,5cyl}$	$P_{2,5incl}$
<i>Couche</i>									
1	20,8 (\pm 2,77)	10	8	21,4 (\pm 1,82)	13	10	15,6 (\pm 1,34)	20	15
2	39,2 (\pm 1,64)	20	15	42 (\pm 2,34)	24	19	40 (\pm 8,74)	39	29
3	44 (\pm 3,8)	36	28	47 (\pm 2,70)	44	35	47 (\pm 8,58)	69	54
4	49,8 (\pm 3,27)	51	39	53,4 (\pm 3,78)	62	49	55,2 (\pm 8,58)	97	74
5	56,6 (\pm 2,51)	66	47	60 (\pm 5,05)	80	62	66 (\pm 6,60)	123	96

cylindre 4 cm, les valeurs sont respectivement de 21,4 et 42 mm Hg (\pm 1,82-2,34) versus 19,2 et 32 mm Hg (\pm 2,17-0,71). Pour le cylindre 2,5 cm, les valeurs étaient respectivement 15,6 et 40 mm Hg (\pm 1,34-8,74) versus 22,8 et 38,8 mm Hg (\pm 3,27-3,11).

Excepté sur le petit cylindre ($r_{2,5}$), les deux couches exerçaient successivement des pressions qui suivent une progression linéaire (Fig. 6).

Les P_{man} relevées sous les deux couches de la bande coton étaient toujours supérieures aux P_{cyl} et P_{incl} . Les P_{man} finales variaient dans une marge étroite de 57-60-66 mm Hg (chiffres nets). Ces valeurs sont sans communes mesures avec les valeurs estimées qui culmineraient à des sommets de 66-80-123 mm Hg pour la P_{cyl} et de 47-62-96 mm Hg pour la P_{incl} .

3^e expérimentation sur cylindre de 5 cm de rayon incluant une couche de mousse

Pression corticale

La pression corticale est la pression appliquée par la bande sur la mousse (Tableau III).

La pression corticale mesurée par une bande coton était de 27,8 mm Hg (\pm 4) sur la mousse dure et de 22,8 mm Hg (\pm 3) sur mousse molle. La deuxième couche de bande coton a

Tableau III. Valeurs en mmHg des pressions corticales (P_{cort}) et sous-corticales (P_{ss^cort}) moyennes P (mmHg) manométriques (man) et leurs écarts types selon un cylindre de 5 cm de rayon dont 2 cm de mousse par-dessus 2 couches de bande coton et sous 1-2-3 couche (s) de bande élastique selon qu'il s'agit d'une mousse dure ou molle.

P_{5man}	Mousse dure	Mousse molle
<i>Sans bandage</i>		
P_{cort}	0	0
P_{ss^cort}	27,4 (\pm 1,5)	10 (\pm 1,7)
<i>1 couche coton</i>		
P_{cort}	27,8 (\pm 4)	22,8 (\pm 3)
P_{ss^cort}	41,2 (\pm 1,3)	25 (\pm 3,7)
<i>2 couches coton</i>		
P_{cort}	34,2 (\pm 3)	30,4 (\pm 5,4)
P_{ss^cort}	45,8 (\pm 2,5)	32,2 (\pm 4,3)
<i>1 couche élastique</i>		
P_{cort}	35 (\pm 2,4)	32 (\pm 3,6)
P_{ss^cort}	46 (\pm 1,9)	34 (\pm 3,3)
<i>2 couches élastiques</i>		
P_{cort}	38,2 (\pm 1,9)	39 (\pm 1,9)
P_{ss^cort}	49 (\pm 2)	40,4 (\pm 1,1)
<i>3 couches élastiques</i>		
P_{cort}	44 (\pm 1,7)	48,2 (\pm 1,1)
P_{ss^cort}	52,2 (\pm 1,1)	48,6 (\pm 2,1)

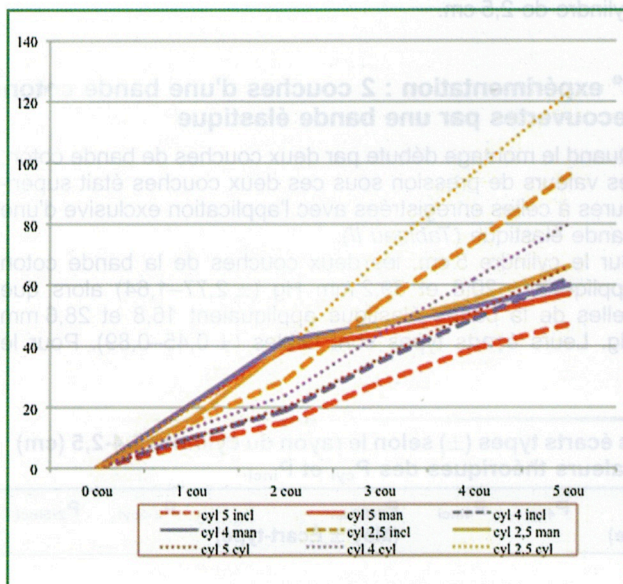


Figure 6. Progression des pressions moyennes sous deux couches d'une bande coton (cou1-2) puis trois d'une bande élastique sur trois cylindres solides de 5-4-2,5 cm de rayon.

augmenté cette pression corticale de 6,4 mm Hg sur mousse dure et de 7,6 mm Hg sur la mousse molle. La superposition des 3 couches de bandes élastiques a augmenté la pression corticale successivement de 0,8 puis 3,2 et 5,8 mm Hg sur la mousse dure et de 1,6 puis 7 et 9,2 mm Hg sur la mousse molle.

L'application d'une bande coton sur la mousse se traduit par une augmentation de pression sous corticale. Avec une mousse dure, lorsque 27,8 mm Hg sont appliqués en surface, une augmentation de 13,8 mm Hg est provoquée en profondeur. Avec une mousse molle, lorsque 22,8 mm Hg sont appliqués en surface l'augmentation était de 20,4 mm Hg en profondeur. La deuxième couche de bande coton a augmenté la pression en profondeur de 4,6 mm Hg sous la mousse dure et de 7,2 mm Hg pour la mousse molle.

La superposition des 3 couches de bandes élastiques a augmenté la pression sous corticale de 0,2 puis 3 et 3,2 mm Hg sous la mousse dure et de 1,8 puis 6,4 et 8,2 mm Hg sous la mousse molle.

Pression sous-corticale

La pression sous corticale est la pression appliquée sous la mousse à l'interface mousse/cylindre. Elle a été mesurée à une valeur de 27,8 et 22,8 mm Hg respectivement pour la mousse dure et molle. Cette valeur de « repos » sans bandage correspond à la contrainte de la mousse sur le cylindre.

Les pressions « brutes » avec la superposition des différentes couches ($P_{1,2,3,4,5}^{ss-cort}$) atteignent successivement sous la mousse dure 41,2–45,8–46–49–52,2 mm Hg et sous la mousse molle 25–32,2–34–40,4–48,6 mm Hg (Fig. 7).

Pour la mousse dure, la première couche de bande coton qui appliquait 27,8 mm Hg en surface a fait augmenter la pression sous corticale de 13,4 mm Hg. La deuxième couche de cette bande augmentant la pression corticale de 16,4 mm Hg, a fait augmenter la pression sous corticale de 4,6 mm Hg.

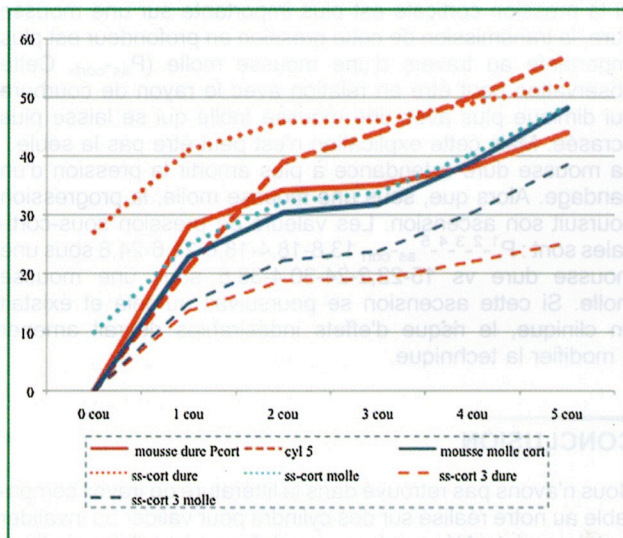


Figure 7. Progression des pressions moyennes corticales (P_{cort}^{5} ; P_{cyl5}) et sous corticales (ss-cort 3), de part et d'autre d'une mousse dure de 43 kg/m³ ou molle de 26 kg/m³.

Lorsque la bande utilisée est la bande élastique, les trois couches mises en place on fait augmenter la pression sous corticale successivement de 0,2–3–3,2 mm Hg.

Pour la mousse molle, la pression de bande en coton qui applique 22,8 mm Hg en surface augmente de 15 mm Hg la pression sous corticale. La deuxième couche de cette bande en coton qui augmente la pression corticale de 7,6 augmente la pression sous corticale de 7,2. Les 3 couches de bande élastique augmentent la pression sous corticale successivement de 1,8–6,4–8,2 mm Hg.

DISCUSSION

Le but de cette étude préliminaire était de chercher à vérifier à partir de la pression théorique de Laplace, l'impact des corrections liées à l'obliquité de la pose des bandes et d'observer ces pressions sur des cylindres différents. Les résultats de cette étude doivent être interprétés avec précaution. Le nombre de cinq répétitions par un seul expérimentateur limite la force des conclusions. Néanmoins un certain nombre remarques sont relevées.

En opposition avec les données théoriques, le nombre de couches de bandes élastiques appliquées sur un cylindre dur (sans mousse) par un expérimentateur ne multiplie pas avec une extrême précision par 2–3 la pression. Mais conformément à cette loi, la pression augmente en fonction inverse du rayon de courbure : plus le rayon est petit, plus la pression est importante.

Ainsi, sur un cylindre dur de 5 cm, la pose d'une bande élastique exerce une pression de 16,8–28,9–39,4 mm Hg, respectivement sous la première, seconde, troisième couche.

Par ailleurs pour interpréter les différences observées entre la pression mesurée (P_{man}) et la pression théorique, il convenait d'intégrer l'inclinaison de la bande sur le cylindre (P_{incl}). Cette inclinaison est liée au recouvrement par tiers. Le rayon de courbure est ainsi augmenté. La détermination de ce r_{incl} a servi à corriger les résultats obtenus à partir du rayon du cylindre. Pour un cylindre de rayon de 5 cm, dans les limites de l'étude, les pressions enregistrées (P_{man}) restent supérieures : 16,8–28,6–39,4 versus 13–25–37 pour les valeurs théoriques d'inclinaison (P_{incl}). Il est possible que cet écart soit, lié à la main de l'expérimentateur et non à une réelle différence, qui serait à confirmer par un étude de plus approfondit incluant une comparaison statistique. Malgré son application, la régularité de la traction manuelle de la bande n'est pas comparable à l'exactitude d'une formule mathématique. Il en résulte une élévation exponentielle de la compression [14].

Il est classiquement admis que l'application d'une bande coton (inélastique) applique une faible pression lorsqu'elle est appliquée sans tension. En revanche nos mesures montrent que lorsqu'elle est étirée et lissée sur les cylindres, elle applique une pression non seulement non négligeable mais supérieure à celle des bandes élastiques. La contrainte d'allongement par sa mise en tension atteint vite les limites d'élasticité avec une bande à allongement court [14]. Les différences observées sont à confirmer par des études portant sur des prises de mesures plus nombreuses car les écart type relevés, donc la variabilité d'une mesure à l'autre, sont parfois importants.

Tableau IV. Valeurs des pressions moyennes P (mmHg) manométriques (man) et leurs écarts types selon le rayon du cylindre 5-4-2,5 (cm) sous 1-2-3 couche(s) de bande élastique selon qu'elles sont appliquées directement sur les cylindres ou par-dessus deux couches de bande coton.

Bande élastique	Bande coton					
	Sans	Sans	Sans	Sans/Sur	Sur	Sur
P(mmHg)	P _{5man} (Moy ± Écart-type)	P _{4man} (Moy ± ± Écart-type)	P _{2,5man} (Moy ± Écart-type)	P _{5man} (Moy ± Écart-type)	P _{4man} (Moy ± Écart-type)	P _{2,5man} (Moy ± Écart-type)
<i>Couche</i>						
1 Couche coton				20,8 (±2,7)	21,4 (±1,8)	15,6(±1,3)
2 couches coton				39,2 (±1,6)	42 (±2,3)	40 (±8,7)
1 couche élastique	17 (±0,45)	19 (±2,17)	23 (±3,3)	44 (±2,2) (44 = 39,2 + 4,8)	47 (±2,7) (47 = 42 + 5)	47 (±8,6) (47 = 40 + 7)
2 couches élastiques	29 (±0,9)	32 (±0,71)	39 (±3,1)	49,2 (±2) (49,2 = 44 + 5,2)	53,4 (±4) (53,4 = 47 + 6,4)	55,2 (±9) (55,2 = 47 + 8,2)
3 couches élastiques	39 (±1,95)	43 (±1,8)	53 (±7,89)	56,6 (±2,1) (56,6 = 49,2 + 7,4)	60 (±5,05) (60 = 53,4 + 6,6)	66 (±6,6) (66 = 55,2 + 10,8)

D'autre part, les trois couches de bande élastique n'exercent pas la même pression (P_{man}) et n'évoluent pas de la même manière selon qu'elles sont posées directement sur les cylindres dur ($cyl^{5-4-2,5}$) ou par-dessus une bande coton (Tableau IV). Lorsque les bandes élastiques sont appliquées sur une double couche de bande coton, l'augmentation de la pression liée à leur recouvrement est relativement faible. Cette superposition de bandes coton diminue l'action compressive de la bande élastique comparée à son action isolée.

Pour un cylindre de 5 cm de rayon, la superposition des trois couches de bande élastique par-dessus la bande en coton n'augmente la P_{5man} respectivement que de 5–6–7 mm Hg (chiffres nets) versus 17–21–10 mm Hg lorsque appliquée directement sur le cylindre. Le même phénomène est retrouvé avec les cylindres 4 et 2,5 cm. Les couches de bandes en coton, sous-jacentes, amortissent la compression. Sur ce point, la *pression de Laplace* (formule 2) ne donne pas de réponse et les travaux récents [15] restent silencieux.

Enfin, L'application des bandes sur un cylindre recouvert de mousse semble modifier les pressions appliquées. Cette observation met en évidence l'influence de la consistance des tissus comprimés sur la valeur de compression.

Dans notre étude, l'application du bandage sur des mousses cherche à faire un parallèle simplifié avec les pressions exercées en clinique humaine. La mousse symbolise la couche de l'œdème. Sa densité et sa consistance sont variables. Sous cet angle, le 3^e volet expérimental réalise une approche de la pression exercée sur la peau par la pression corticale et de celle appliquée plus en profondeur sur les aponévroses par la pression sous-corticale.

On observe que quelle que soit la mousse dure ou molle, la pression appliquée en surface par les bandes coton a tendance à être supérieure à celle appliquée sur un cylindre dur.

Quelle que soit la densité de la mousse, c'est la première couche de bande coton qui comprime le plus en superficie.

La pression appliquée sur la mousse dure est plus importante que sur la molle. La deuxième couche de bande coton augmente la pression de la première couche de l'ordre de seulement 30 %. Cette deuxième couche augmente peu la pression mais augmente la rigidité du bandage [16]. La superposition des bandes élastiques augmente alors la pression corticale mais de manière plus faible.

La superposition des 3 couches bandes élastiques augmente ensuite différemment la pression corticale selon le type de mousse. Cette augmentation est successivement de 0,8–3,2–5,8 mm Hg sur la mousse dure, et de 1,6–7–9,2 mm Hg sur la mousse molle. Les écarts types de ces différentes valeurs sont faibles. L'augmentation de pression corticale est plus importante sur la mousse molle.

Si la pression corticale est plus importante sur une mousse dure, la transmission de cette pression en profondeur est plus importante au travers d'une mousse molle ($P_{ss-cort}$). Cette observation peut être en relation avec le rayon de courbure qui diminue plus avec une mousse molle qui se laisse plus écrasée. Mais cette explication n'est peut-être pas la seule. La mousse dure a tendance à plus amortir la pression d'un bandage. Alors que, sous une mousse molle, la progression poursuit son ascension. Les valeurs de pression sous-corticales sont : $P^{1-2-3-4-5}_{ss-cort}$ 13,8-18,4-18,6-21,6-24,8 sous une mousse dure vs 15-22,2-24-30,4-38,6 sous une mousse molle. Si cette ascension se poursuivait au-delà et existait en clinique, le risque d'effets indésirables devrait amener à modifier la technique.

CONCLUSION

Nous n'avons pas retrouvé dans la littérature de travail comparable au notre réalisé sur des cylindres pour valider ou invalider certains points. Néanmoins, un certain nombre d'observations sont à relever à l'issue de cette étude préliminaire même si elle ne porte que sur un nombre peu élevé de prises de mesure ne permettant pas une analyse statistique utile.

Conformément aux formules mathématiques, quelques soient les bandes, il est confirmé que plus le rayon de courbure est petit, plus la compression est forte ; plus le nombre de couches est grand, plus la compression augmente. Sur différents calibres de cylindres durs, les pressions manométriques relevées diffèrent des pressions prédites par les transformées de Laplace. L'application des bandes coton avec la technique de pose utilisée semblent appliquer plus de compression que les bandes élastiques, leur courbe d'hystérésis étant différente.

D'autre part, il existe des variations des pressions dues à des bandes coton (inélastiques) ou élastiques (allongement long) posées ou non sur deux types de mousse. La proportionnalité n'est pas en relation directe. À rayon identique, les pressions exercées sont différentes selon la densité du support. Dans les limites de notre étude, trois mécanismes expliquent l'hétérogénéité et le décalage obtenus :

- la variation de la tension des bandes ;
- l'inclinaison des bandes ;
- les consistance des cylindres, liées à la densité des mousses testées, pour résister à la compression (43 et 26 Kg) et modifier les pressions inter-fasciales.

En est-il de même en clinique humaine sur un œdème dont la consistance varie ? Quelle est la pression réelle exercée sur les collecteurs ? De très nombreux paramètres interfèrent : la texture fluctuante des différents tissus (os, muscles, tendons, graisse, œdème), la diminution du volume du membre par chasse du volume de sang piégé dans les veines, les modifications des échanges microcirculatoires liée à la compression, la technique de pose des bandes, la réponse aux mouvements. D'autre part, l'élasticité en largeur associée à la longueur est un caractère spécifique des bandes élastiques utilisées (Biflex®) qui pose question : il n'apparaît dans aucune formule mathématique.

En clinique humaine, la consistance des œdèmes peut être très différente. Certains œdèmes prenant le godet sont très mous, d'autres comme certains lymphœdèmes sont très durs. Si la comparaison entre les pressions appliquées sur les cylindres de texture différentes et celles appliquées sur des œdèmes de consistance équivalente se révélait transposable, une notion importante serait mise en évidence. Ainsi, à bandage identique les pressions appliquées en surface sur les œdèmes durs seraient plus importantes que sur les œdèmes mous alors que, les pressions appliquées en profondeur seraient moins importantes que sur ces derniers.

Ce travail préliminaire doit maintenant être poursuivi par d'autres études réalisées en situation clinique. L'approche sur cylindre n'est qu'une approche particulièrement naïve des phénomènes réels induit par une compression sur un membre humain. Les réponses se compliquent avec les contractions musculaires qui font varier le rayon de courbure ainsi que la dureté du support musculaire sur lequel s'applique un bandage.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

RÉFÉRENCES

- [1] International Lymphoedema Framework. Best practice for the management of lymphoedema: international consensus, 2d ed, London: MEP Ltd; 2012 [76 p].
- [2] International Society of Lymphology. The diagnosis and treatment of peripheral lymphedema: 2016 consensus document. *Lymphology* 2016;49:170–84.
- [3] Ferrandez JC, Bouchet JY, Theys S, Torres-Lacomba M. *Physiothérapie des œdèmes. De la clinique à la pratique*. Paris: Ed Elsevier Masson; 2016.
- [4] Van der Molen HR, Kuiper J. Mesure de la compression en thérapeutique phlébologique et notamment de la pression permanente efficace après réduction de l'œdème. *Phlebologie* 1960;13:105–12.
- [5] Kuiper JP, Brakkee AJM. Les effets de la compression sur la pression veineuse et le volume des membres: résultats paradoxaux. *Phlebologie* 1990;43:157–66.
- [6] Haute Autorité de Santé. Les dispositifs médicaux et les technologies de santé. Avis de la commission nationale d'évaluation; 2012 [HAS].
- [7] Basford JR. The law of Laplace and its relevance to contemporary medicine and rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil* 2002;83:1165–70.
- [8] Moffatt C. Variability of pressure provided by sustained compression. *Int Wound J* 2008;5:259–65.
- [9] Melhuish JM, Clark M, Williams RJ, Harding KG. The physics of sub-bandage pressure measurement. *J Wound Care* 2000;9:308–10.
- [10] Thomas S. The use of the Laplace equation in the calculation of sub-bandage pressure. *EWMA J* 2003;3:21–3.
- [11] Ferrandez JC. Evaluation de l'efficacité de deux types de bandages de décongestion du lymphœdème secondaire du membre supérieur. *Kinesither Rev* 2007;67:30–5.
- [12] Van den Kerckhove E, Fieuws S, Massagé P, Hierner R, Boeckx W, Deleuze JP, et al. Reproducibility of repeated measurements with the Kikuhime pressure sensor under pressure garments in burn scar treatment. *Burns* 2007;5:572–8.
- [13] Mc Laren J, Helmer RJN, Horne SL, Blanchonette I. 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). Preliminary development of a wearable device for dynamic pressure measurement in garments, 2. 2010; p. 3041–6 [Procedia Engineering].
- [14] Mollard JM, Lance G. [Contention/compression élastique EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Angéiologie, 19-3640, 2005]. *Kinesither Med Phys Readapt* 2007 [26-565-A-10].
- [15] Dubuis L. *Biomécanique des tissus mous de la jambe humaine sous compression élastique*. In: Thèse en mécanique et ingénierie. Saint-Etienne: École Nat-Mines; 2011.
- [16] Cornu-Thénard A. Réduction d'un œdème veineux par bas élastiques, unique ou superposés. *Phlebologie* 1985;38:159–68.