



HAL
open science

Répartition de la force d'appui sur les protecteurs des genoux.

P. Marchal, M. Jacques

► **To cite this version:**

P. Marchal, M. Jacques. Répartition de la force d'appui sur les protecteurs des genoux.. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 319, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 2014, 60 p., ill., bibliogr. hal-01420577

HAL Id: hal-01420577

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420577v1>

Submitted on 20 Dec 2016

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.



Répartition de la force d'appui sur les protecteurs des genoux

Répartition de la force d'appui sur les protecteurs des genoux

Patrice Marchal
Michel Jacques

NS 319
février 2014

Répartition de la force d'appui sur les protecteurs des genoux

Résumé

De nombreuses situations de travail nécessitent l'utilisation de genouillères, qui sont testées selon la norme européenne EN 14404. L'objectif de cette étude était d'analyser la pertinence de certains paramètres de l'essai de répartition de la force d'appui, en particulier la position des 3 points de mesure, le genou artificiel utilisé et la valeur limite de 30 N.

Les positions des trois capteurs définis dans la norme ne permettent pas d'avoir la garantie de mesurer la pression maximale. La nappe de capteurs de pression mise en œuvre dans cette étude donne une cartographie complète et immédiate de la répartition de la force d'appui.

Trois genoux artificiels de différentes tailles et un genou simplifié ont été définis et comparés : selon les types de genouillère, la répartition de la force peut varier. Mais les pressions obtenues avec le genou simplifié sont dans les gammes de celles relevées avec les autres genoux. Son utilisation peut donc être envisagée, à la place du genou actuel difficile à fabriquer et non représentatif de la diversité des morphologies.

Enfin, au vu du panel de protecteurs évalués lors des essais subjectifs, nous pouvons conclure que la limite de 30 N spécifiée par la norme est cohérente avec le confort ressenti par les sujets d'essai.

Répartition de la force d'appui sur les protecteurs des genoux

Sommaire

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introduction | 9 |
| 2 | Matériel et méthode..... | 11 |
| 2.1 | Protecteurs des genoux..... | 12 |
| 2.2 | Pertinence des positions des 3 points de mesure de la répartition de la force | 13 |
| | Recherche d'un moyen de mesure de la répartition de la force..... | 13 |
| | Recherche de l'effort maximum | 14 |
| 2.3 | Représentativité du genou normalisé..... | 14 |
| 2.3.1 | Définition et fabrication de genoux représentatifs de différentes tailles | 14 |
| 2.3.2 | Définition d'un genou simplifié | 17 |
| 2.3.3 | Mesures de la répartition de l'effort avec les différents genoux..... | 17 |
| 2.4 | Validation de la force maximale spécifiée par la norme EN 14404..... | 18 |
| 2.4.1 | Choix de la position d'essai | 18 |
| 2.4.2 | Evaluation des genouillères | 19 |
| 2.4.3 | Comité de Protection des Personnes..... | 19 |
| 3 | Résultats | 20 |
| 3.1 | Validation de la nappe de capteurs de pression | 20 |
| 3.2 | Comparaison de la pression maximale avec les valeurs des capteurs de force..... | 21 |
| 3.3 | Représentativité du genou..... | 22 |
| 3.3.1 | Genoux artificiels représentatifs de différentes tailles | 22 |
| 3.3.2 | Mesures comparatives avec les 3 genoux et le genou simplifié | 22 |
| 3.4 | Validation de la spécification de la norme..... | 26 |
| 4 | Discussion et conclusions | 29 |
| 4.1 | Position des points de mesure..... | 29 |
| 4.2 | Genoux représentatifs | 29 |
| 4.3 | Valeur limite de la force d'appui..... | 30 |
| 5 | Bibliographie | 31 |

1 Introduction

L'hygroma du genou est une affection péri-articulaire qui produit une inflammation des tissus sous-cutanés des zones d'appui du genou. Il touche principalement les personnes travaillant souvent à genoux (carreleurs, poseurs de revêtement de sol, électriciens, couvreurs, plombiers, etc.). En 2012, environ 400 maladies professionnelles ont été déclarées (tableau N 57D).

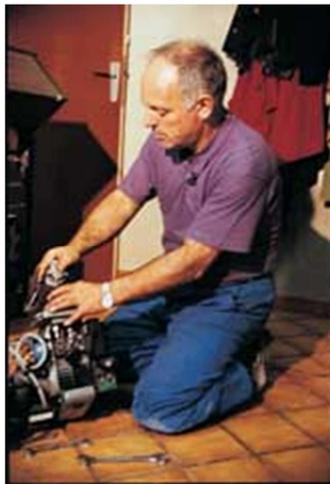


Figure 1 : électricien travaillant à genou.

Pour limiter ces risques, les travailleurs ont à leur disposition des protecteurs des genoux testés selon la norme européenne EN 14404 [1]. Cette norme définit les spécifications et les méthodes d'essai des protecteurs des genoux. En particulier, elle donne une valeur limite de l'effort d'appui au niveau du genou et une méthode d'essai pour le mesurer. L'essai consiste à appliquer une force de 750 N sur un genou artificiel équipé du protecteur des genoux à tester. Trois capteurs de force sont disposés sur le genou et permettent la mesure de la répartition de la force, qui ne doit pas dépasser 30 N par capteur (cf. figure 2).

Pour les essais, la norme définit un genou de référence (cf. annexe 1), dont les dimensions ont été déterminées par moulage sur un sujet humain. Aucune validation de ce genou n'a été faite en vue de vérifier sa représentativité en termes de répartition des efforts et de surface d'appui. On peut s'interroger sur l'existence d'un genou humain représentatif, et sur la possibilité de concevoir un genou avec des formes géométriques simples et facilement reproductibles, avec lequel on obtiendrait des résultats tout aussi pertinents.

La méthode normalisée de mesure de répartition de la force d'appui préconise seulement 3 capteurs de force situés aux endroits les plus critiques, mais elle ne permet pas d'obtenir une cartographie suffisante de la répartition de la force, et en particulier d'en déterminer la valeur maximale, dans la zone où est susceptible de se développer l'hygroma. Par exemple, si la surface du protecteur est conçue pour réduire l'appui au niveau des 3 capteurs, un protecteur composé d'un matériau de mauvaise qualité serait conforme à la norme, alors qu'il ne donnerait pas satisfaction aux utilisateurs.

La valeur limite de 30 N a été définie à partir d'un consensus entre les différents participants du groupe de normalisation sur la base de genouillères estimées confortables par ce groupe, sans étude sur sujets permettant d'asseoir cette valeur.

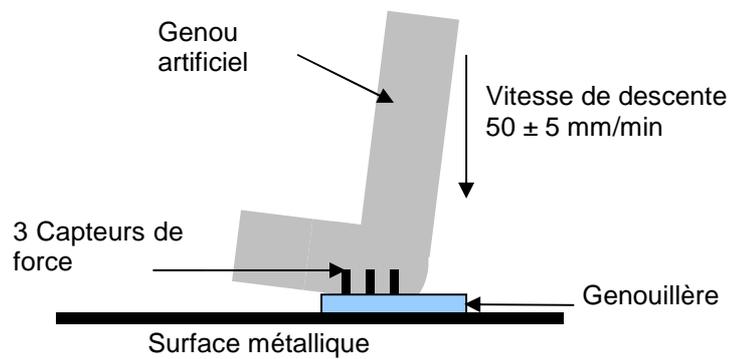


Figure 2 : représentation schématique du banc de mesure de la répartition de la force.

L'objectif de cette étude est d'analyser la pertinence des paramètres d'essai suivants :

- les positions des 3 points de mesure de la force d'appui et les moyens de mesure utilisés,
- le genou artificiel défini dans la norme,
- la valeur limite de 30 N pour des capteurs de force dont la surface de mesure est un disque de diamètre de 1 cm.

Le cas échéant des améliorations de la méthode d'essai seront proposées, en vue de garantir qu'elle permet de mesurer la répartition de la force, sur tous les types de protecteurs des genoux, quelles que soient leurs formes et leurs particularités.

La pertinence des autres paramètres de cet essai n'est pas remise en cause.

2 Matériel et méthode

En préalable, en collaboration avec les experts physiologistes de l'INRS, une étude bibliographique a été réalisée afin de recenser les études sur l'hygroma du genou et ses moyens de prévention [2], [3].

Les seuls éléments trouvés sont les moyens pour soigner cette maladie. Nous n'avons repéré aucune étude mettant en évidence le lien de cause à effet entre la position à genou sans protecteur et l'apparition de l'hygroma du genou. Les utilisateurs de protecteurs indiquent que l'utilisation de protecteur des genoux leur permet de diminuer les douleurs aux genoux et ainsi de travailler plus longtemps dans cette position.

Il paraît pertinent de penser que plus la pression sur le genou sera faible et répartie, plus le risque d'hygroma sera limité. Mais en l'absence de certitude sur le sujet, la validation de la spécification de la norme a été basée dans cette étude sur le ressenti de confort par les sujets d'essai.

Afin de répondre aux trois objectifs, les principales étapes de cette étude ont été les suivantes (cf. figure 3).

Objectif 1 – Vérification de la pertinence de la position des 3 points de mesure :

- définition d'un moyen de mesure permettant d'avoir une cartographie complète de la répartition de la pression exercée au niveau des genoux. En outre, ce matériel devait être utilisable lors des mesures avec des sujets d'essai,
- mesure d'un panel de genouillères, afin de déterminer la position de la pression maximale.

Objectif 2 - Vérification de la pertinence du genou normalisé : influence de la taille et de la forme du genou et recherche d'un genou simplifié :

- définition des genoux représentatifs de différentes tailles,
- définition d'un genou de formes géométriques simples,
- mesures comparatives d'un panel de genouillères avec les différents genoux.

Objectif 3 - Validation de la valeur limite de 30 N :

- définition de la position agenouillée représentative d'une position de travail,
- mesure de la répartition de l'effort sur des sujets d'essai et corrélation avec leur ressenti du confort.

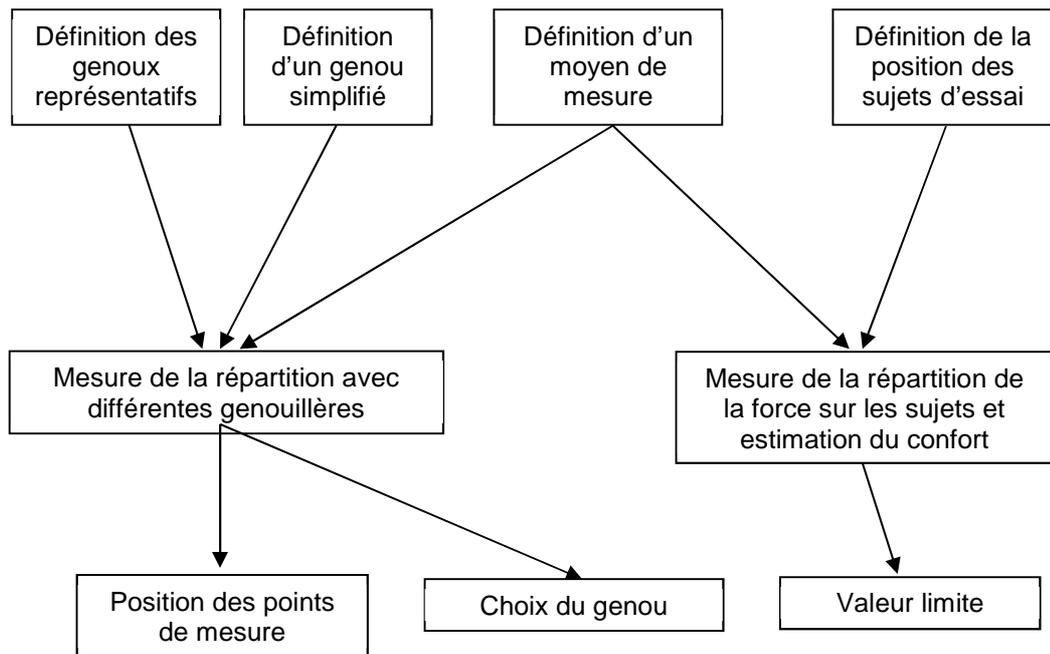


Figure 3 : déroulement de l'étude.

2.1 Protecteurs des genoux

Un panel de 71 protecteurs a été choisi pour couvrir une large gamme de répartition de la force et de formes (formés ou non) disponibles sur le marché. Ils sont constitués de tissus, de mousse ou de caoutchouc avec ou sans coque (cf. figures 4 et 5).



Figure 4 : plaque



Figure 5 : protecteur formé

Dans cette étude, nous avons considéré deux grandes familles de genouillères :

- les plaques de mousse homogène d'épaisseur constante,
- les genouillères formées.

Sur les plaques de mousse homogène, la position de l'effort maximal est généralement connue : il s'agit du premier point de contact du genou sur le sol, c'est-à-dire la position du capteur de force n°2 tel qu'elle est définie dans la norme. Afin d'évaluer l'influence intrinsèque de la forme et de la taille des genoux, en s'affranchissant des variations de la répartition de l'effort liées à la forme de la genouillère, des mesures ont été effectuées dans un premier temps sur une série de mousses homogènes et planes de différentes épaisseurs et densités. Ces mousses étaient à alvéoles fermées ce qui leur permettait de retrouver leur forme d'origine après écrasement.

Dans un deuxième temps, les mesures ont été effectuées sur les genouillères formées, avec les différents genoux, afin d'évaluer leur influence sur la répartition de l'effort. En particulier, les points de contacts peuvent être répartis différemment sur les genouillères formées en fonction :

- de la forme et de la taille de la genouillère,
- de la forme et de la taille du genou.

Parmi ces 71 protecteurs, 10 ont été sélectionnés pour être évalués par des sujets. Ils devaient être représentatifs des formes disponibles sur le marché et des différents moyens de fixation. Ils devaient également permettre de proposer une répartition très large de la force, mesurée selon le protocole défini par la norme : les pressions maximales étaient comprises entre 15 et 145 N/cm².

2.2 Pertinence des positions des 3 points de mesure de la répartition de la force

Le banc d'essai utilisé pour cette étude se compose d'un banc de traction/compression sur lequel est monté un genou artificiel. Le banc de traction permet d'établir une vitesse de descente du genou artificiel de 50 ± 5 mm/min jusqu'à atteindre une force de 750 N sur la jambe. Cette force est maintenue 20 s. Les valeurs de répartition de la force entre le genou et le protecteur sont relevées après 15 s d'appui. Dans la méthode normalisée, la force est mesurée à l'aide de 3 capteurs de force, en 3 positions définies (cf. annexe 1).

Recherche d'un moyen de mesure de la répartition de la force

L'objectif de cette phase a été de trouver un moyen qui :

- permette de mesurer la répartition de la force ou de la pression sur toute la surface d'appui du genou, afin de pouvoir établir une cartographie de cette répartition, de déterminer le maximum de la force et la position de ce maximum,
- soit utilisable avec un genou artificiel, mais également avec des sujets d'essai pour vérifier la limite définie par la norme EN 14404.

Le choix s'est orienté vers une nappe de capteurs de pression de 16 x 16 cm équipée de 1024 capteurs de pression de 5 mm de côté. Ce moyen avait pour avantage de s'inscrire dans le système Nowell présent à l'INRS, qui avait déjà été évalué dans le cadre d'autres études. La nappe est calibrée selon le principe défini par le fabricant. Une pression contrôlée est appliquée sur toute la surface de la nappe. Elle est obtenue à l'aide d'une chambre à air gonflée et est mesurée avec un manomètre de précision.

La validation de la mesure avec la nappe par rapport à la méthode de mesure préconisée par la norme EN 14404 a été effectuée en mesurant des protecteurs des genoux de conceptions différentes, en superposant la nappe de capteurs de pression au genou normalisé équipé des 3 capteurs de force. Les valeurs obtenues avec les 3 capteurs de force, aux 3 positions définies par la norme, ont été comparées avec celles obtenues aux mêmes positions avec la nappe de capteurs de pression.

Dans toute la suite de ce document, afin de pouvoir comparer les pressions (en N/cm²) mesurées par la nappe aux forces (en N) mesurées par les 3 capteurs normalisés, les forces ont été ramenées en pression en les divisant par la surface d'appui du capteur (disque de diamètre 1 cm) : $P = F / (\pi \times 0,5^2)$. Ainsi la valeur limite de 30 N définie par la norme EN 14404 et associée à un capteur de force dont la surface d'appui est un disque de 1 cm de diamètre, correspond à une pression de 38 N/cm².

Par ailleurs, des pré-essais ont été réalisés avec la nappe pour mesurer la pression au niveau du genou avec des sujets et vérifier sa robustesse et sa souplesse.

Recherche de l'effort maximum

L'objectif était de déterminer l'effort maximum sur un panel de genouillères différentes, afin de vérifier s'il correspondait ou non à l'effort relevé à l'une des 3 positions de mesure définies dans la norme.

La pression maximale a été relevée avec la nappe de capteurs de pression lors de la comparaison de cette nappe avec les 3 capteurs de force (cf. § 2.1).

2.3 Représentativité du genou normalisé

Pour les essais, la norme définit un genou de référence (cf. annexe 1), dont les dimensions ont été déterminées par moulage sur un sujet humain ; ce genou est plutôt représentatif d'une grande taille.

Cette phase avait pour objectif d'évaluer l'influence de la taille et de la forme du genou sur la répartition de la force d'appui et donc sur la pression maximale. Pour cela, ont été définis et fabriqués :

- trois genoux de tailles différentes ayant des formes représentatives de genoux humains,
- un genou simplifié constitué de formes géométriques simples et facilement représentables.

Ensuite, les mesures de la répartition de la force ont été réalisées sur des genouillères successivement avec ces 4 genoux.

2.3.1 Définition et fabrication de genoux représentatifs de différentes tailles

L'objectif était de définir et réaliser 3 genoux représentatifs de tailles différentes : grande, moyenne et petite.

Pour cela, 40 genoux ont été numérisés. Le genou moyen a été défini à partir de l'ensemble des modélisations. Un genou moyen théorique a été calculé en prenant la moyenne des 40 numérisations. Chaque genou numérisé a été ensuite comparée au genou moyen théorique, afin de trouver celui s'en rapprochant le plus : ce dernier a été pris comme étant le genou moyen représentatif et a été fabriqué.

De la même façon, un genou représentatif des petites tailles a été défini sur la base des 20 plus petits genoux numérisés, et un genou représentatif des grandes tailles sur la base des 20 plus grands genoux.

Les dimensions du genou simplifié ont été définies à partir du genou moyen représentatif.

Numérisation des genoux

Les numérisations des genoux ont été réalisées à l'aide d'un scanner laser 3D vi910, par la Société Technic'Ortho spécialisée dans la fabrication de prothèses pour handicapés. L'acquisition de la géométrie a été effectuée par un balayage laser et une triangulation, ce qui permet d'offrir une numérisation :

- rapide : 0,3 s par prise de vue avec 6 prises par personne,
- précise : la précision selon les axes est de :

- $\pm 0,22$ mm sur l'axe X,
- $\pm 0,16$ mm sur l'axe Y,
- $\pm 0,10$ mm sur l'axe Z.

Les genoux de 39 sujets ont été numérisés : les sujets étaient de corpulences différentes pour avoir des genoux de formes et de dimensions très variées. La taille des sujets allaient de 157 cm à 190 cm et leur poids de 51 kg à 126 kg. Les caractéristiques générales des sujets d'essais sont données dans le tableau 6 en annexe 2.

Le genou de la norme a également été numérisé, celui-ci avait été moulé sur le genou d'une personne et correspond à un genou réel. Ne connaissant pas le poids, ni la taille du sujet, il n'a pas été intégré dans les calculs de moyenne.

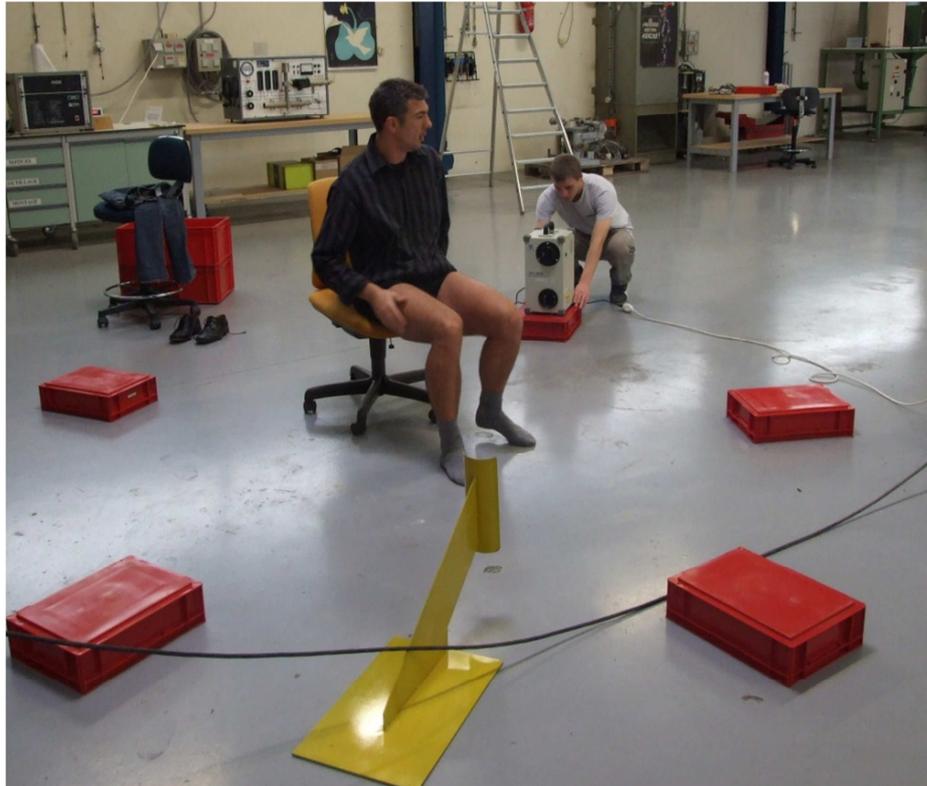


Figure 6 : numérisation d'un genou.

Initialement, il avait été envisagé de numériser le genou du sujet en position agenouillée pour être proche des conditions réelles, mais la surface du genou en appui sur le sol n'était pas visible par le scanner. Pour découvrir cette zone, une solution avait été proposée : le genou était posé sur un coussin à dépression, qui permettait d'obtenir la surface du genou en négatif. L'inconvénient de cette méthode était la perte importante de précision lors de la numérisation de ce moule.

Une deuxième solution a été proposée : numériser la forme du genou d'un sujet assis. La partie du genou en contact avec le sol est la rotule, constituée d'os. Le genou d'un sujet assis a la même forme que le genou en appui sur le sol, à la déformation près de la peau très fine dans cette zone. Les avantages de cette méthode étaient de :

- pouvoir numériser tout le genou par des prises de vues directes et ainsi conserver une bonne précision,
- avoir une position stable, qui évitait que les sujets ne bougent entre les différentes prises de vues, et ainsi limiter les erreurs lors de l'assemblage des différentes prises,
- avoir une bonne reproductibilité de la position demandée à tous les sujets.

Le sujet était installé sur une chaise réglable en hauteur. Cette hauteur était ajustée pour que le fémur soit horizontal et le tibia appuyé sur un support spécifique pour créer un angle de 85° entre le fémur et le tibia. Cet angle provient de la norme EN 14404 et correspond à celui obtenu lorsque la personne est agenouillée conformément à la position choisie pour cette étude.

Six prises de vues ont été effectuées par genou (cf. figure 6) pour éliminer les zones d'ombres et obtenir l'ensemble du genou. Chacune des 6 prises de vue a été ensuite traitée pour créer un fichier numérique de l'enveloppe complète du genou.

Calcul des genoux moyens

Un traitement des numérisations des genoux a été effectué, afin de définir les trois genoux moyens calculés de petite, moyenne et grande tailles mentionnés précédemment.

Pour le calcul du genou moyen de petite taille, seul les 20 plus petits genoux ont été pris en compte, et pour le genou moyen de taille moyenne, l'ensemble des genoux numérisés et pour le grand les 20 plus grands. Le critère de classement des genoux a été la largeur (distances entre les condyles).

Pour définir un genou moyen calculé, les surfaces de chacun des genoux scannés sont positionnées les unes sur les autres en prenant comme référence la zone du genou en contact avec le protecteur et en optimisant au maximum la surface commune. L'optimisation est faite automatiquement avec l'assistance du logiciel.

Les genoux numérisés sont ensuite individuellement comparés au genou calculé afin de définir celui qui s'en rapproche le plus, ce dernier est alors retenu comme étant le genou représentatif de la gamme considérée. Il n'est pas possible de prendre le genou moyen calculé comme genou représentatif, car sa surface est lissée par les calculs de moyenne et les reliefs éliminés.

Ainsi ont été choisis deux genoux numérisés représentatifs des petite et moyenne tailles (cf. figure 7). Concernant la grande taille, le genou normalisé s'est avéré être le plus proche du gros genou calculé.

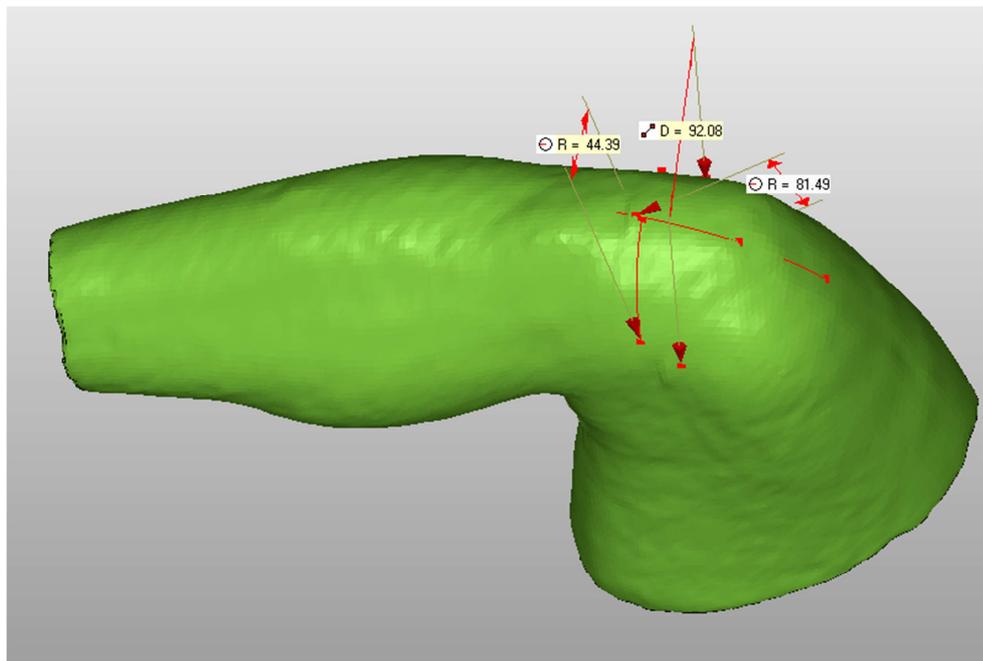


Figure 7 : modélisation du genou représentatif moyen.

Fabrication

Les genoux ont été fabriqués à l'aide d'une fraiseuse numérique. Le matériau utilisé était un mélange de résine polyuréthane et de charges spécifiques, permettant l'obtention d'un matériau isotrope. Ses caractéristiques sont :

- masse volumique 0,70 – 0,72 g/cm³,
- dureté Shore D 64 – 70 DIN 53505,
- résistance en compression 32 Mpa DIN ISO 604,
- flexibilité 31 Mpa DIN ISO 178,
- flèche à la rupture 1200 Mpa DIN ISO 178,
- tenue thermique 80°C Max.

2.3.2 Définition d'un genou simplifié

Les dimensions du genou simplifié ont été définies à partir du genou moyen, sur la base des cotes suivantes (cf. figure 7) :

- le rayon de courbure du genou moyen au niveau de la surface d'appui : environ 80 mm,
- le rayon du tibia partie proche du genou : environ 44 mm,
- la largeur des condyles : environ 90 mm.

Le genou simplifié (cf. figure 15, annexe 3) se compose donc d'un :

- cylindre de diamètre 93 mm pour représenter la partie tibiale,
- cylindre de diamètre 93 mm pour représenter la jambe. La partie jambe n'intervenant pas dans la répartition de la force d'appui, elle est donc simplifiée et a les mêmes formes et mêmes dimensions que la partie tibiale,
- coude avec un rayon de courbure de 80 mm et un diamètre de 93 mm.

2.3.3 Mesures de la répartition de l'effort avec les différents genoux

La mesure de la répartition de l'effort a été effectuée avec les 4 genoux (petite, moyenne et grande tailles et genou simplifié) sur différentes mousses et genouillères, avec la nappe de capteurs de pression choisie. Les autres paramètres d'essais sont restés inchangés et étaient ceux de la norme EN 14404.

Ont été relevés :

- les valeurs de pression aux 3 positions de mesure définies dans la norme : celles-ci ont été déterminées sur les nouveaux genoux de la même façon que sur le genou normalisé : la position du 2^{ème} capteur de force, point central, est la première surface qui vient en contact avec le sol. Les 2 autres positions sont sur l'axe de la jambe, de part et d'autre du point central à une distance de 2,5 cm,
- la valeur de la pression maximale.

Mesures de la répartition de l'effort sur des mousses planes

Dans un premier temps, les mesures ont été réalisées sur les mousses en appliquant la force de 750 N quel que soit le genou. Les pressions relevées avec les différents genoux sur une même mousse ont été comparées.

Dans un deuxième temps, considérant que la force d'appui est fonction de la morphologie des sujets, des mesures ont été réalisées en modulant la force d'appui en fonction de la taille des genoux : elle a été conservée à 750 N avec le gros genou et ajustée avec les autres genoux jusqu'à atteindre la pression maximale obtenue lors de la mesure avec le gros genou.

Les forces d'appui obtenues avec les petite et moyenne tailles et avec le genou simplifié ont été comparées à des forces théoriques ramenées aux poids moyens des sujets. Considérant que la force de 750 N appliquée au gros genou est proportionnelle au poids moyen des 20 plus gros sujets d'essai, les forces théoriques pour les autres genoux ont été définies de la façon suivante :

- pour la taille moyenne et pour le genou simplifié, elle est proportionnelle au poids moyen de l'ensemble des sujets,
- pour la petite taille, elle est proportionnelle au poids moyen des 20 plus petits sujets.

Mesures de la répartition de l'effort sur des genouillères formées

Les mesures ont été effectuées sur une série de genouillères formées, en appliquant la force normalisée de 750 N, afin de comparer pour un même protecteur les pressions obtenues avec les différents genoux.

2.4 Validation de la force maximale spécifiée par la norme EN 14404

Pour évaluer la répartition de la force au niveau du genou, la norme EN 14404 définit une valeur limite : la force ne doit pas être supérieure à 30 N. Cette valeur a été définie sur la base de mesures réalisées sur des genouillères considérées bonnes, mais sans évaluation subjective.

L'objectif de cette phase était de valider cette limite ou de la redéfinir sur la base d'évaluation d'un panel de 10 genouillères par des sujets d'essais. Le principe consiste à évaluer le confort des protecteurs qui est ressenti par les sujets et parallèlement mesurer la pression maximale au niveau du genou. La valeur limite retenue devrait être positionnée de façon à ne considérer conformes que les genouillères jugées confortables.

Le protocole et le moyen de mesure ont dû être définis :

- choix et durée des positions à genoux,
- panel de sujets d'essai,
- échelle d'estimation du confort,
- nombre et période des mesures et notations,
- moyen de mesure de la pression.

2.4.1 Choix de la position d'essai

Une position agenouillée, représentative d'une situation de travail et induisant un maximum de poids sur les genoux, a été définie. Elle devait également être stable et équilibrée (d'avant en arrière et de droite à gauche) pour limiter les variations d'appui sur chacun des genoux pendant les essais et ainsi éviter des écarts lors des mesures.

Différentes postures, schématisées dans le tableau 1, ont été évaluées avec 12 sujets d'essai. La répartition du poids sur les genoux a été mesurée selon la méthode suivante :

- les sujets ont été pesés à l'aide d'une balance de type pèse personnes,
- ils ont pris successivement les positions indiquées dans le tableau 1, chaque genou des sujets d'essai était posé sur une balance (cf. figure 8) afin de relever la répartition du poids sur chacun des genoux.

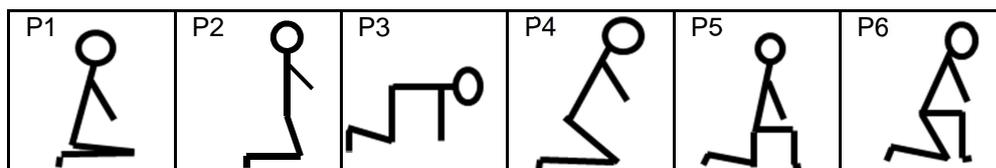


Tableau 1 : différentes positions à genoux.

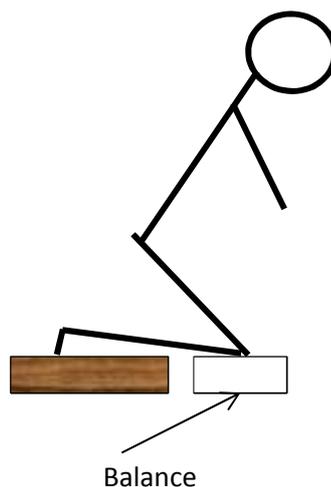


Figure 8 : position agenouillée pour mesurer la répartition sur chacun des 2 genoux.

2.4.2 Evaluation des genouillères

Un protocole d'essai simulait des conditions de travail dans la position agenouillée définie pour cette étude. Les sujets d'essai étaient constitués pour une moitié d'étudiants, donc sans expérience des protecteurs des genoux, et pour l'autre moitié de professionnels utilisant régulièrement des protecteurs.

La pression maximale sur le genou et l'estimation du confort ont été relevées à 3 moments différents :

- T1 : début de la mise en position à genoux,
- T3 : après 3 min immobile sur les 2 genoux,
- T6 : après 6 min, entre T3 et T6 un cycle de mouvements définis dans le protocole était effectué par les sujets d'essais.

Le confort ressenti par les sujets d'essais était évalué sur une échelle graduée de 0 (le moins confortable) à 10 (le plus confortable).

Pour la mesure de la pression maximale, la nappe de capteur de pression était positionnée entre le genou du sujet et la genouillère.

2.4.3 Comité de Protection des Personnes

Toute activité de recherche nécessitant la participation de sujets humains doit être menée en conformité avec la réglementation sur la protection des personnes. Une autorisation a donc été soumise auprès du Comité de Protection des Personnes.

3 Résultats

3.1 Validation de la nappe de capteurs de pression

Les figures 16 à 18 de l'annexe 4 donnent pour chacune des 3 positions de mesure définies par la norme (en bleu : position 1, en rouge : position 2, en vert : position 3), la corrélation entre les mesures de la pression obtenues à l'aide des 3 capteurs de force normalisés et celles, au même point, obtenues avec la nappe de capteurs de pression.

La figure 9 regroupe sur un même graphique les mesures aux 3 positions sur l'ensemble du panel des 71 protecteurs.

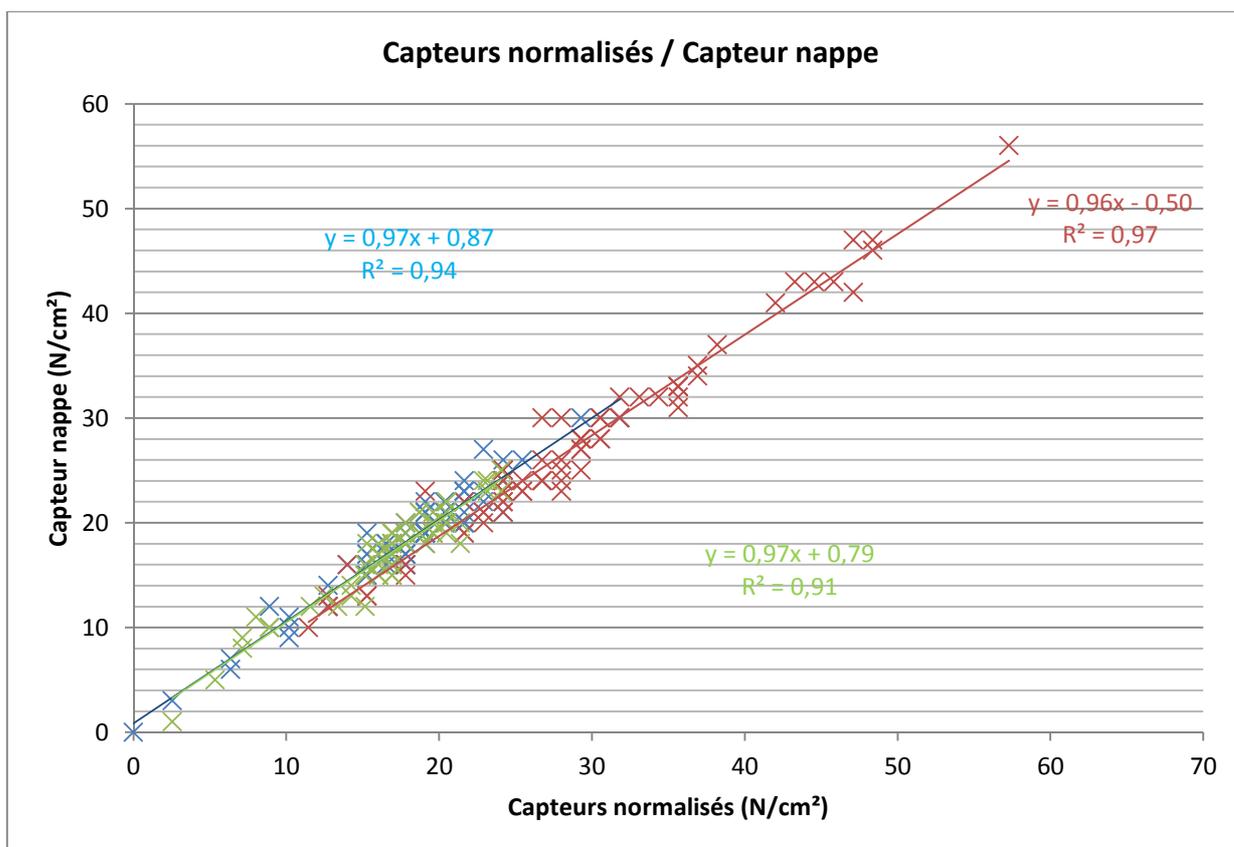


Figure 9 : comparaison des mesures avec les capteurs de force normalisés et celles avec les capteurs de pression de la nappe.

Nous pouvons observer que cette corrélation ne dépend pas du type de genouillère, ni de la position du capteur 1, 2 ou 3. Les coefficients R^2 sont tous les 3 supérieurs à 0,9 et les 3 coefficients directeurs des droites de régression linéaire sont très proches de 1 avec des ordonnées à l'origine comprises entre 0,9 et -0,5.

La corrélation entre l'ensemble des mesures obtenues avec les 3 capteurs de force et celles de la nappe de capteurs de pression est élevée. Le coefficient de corrélation R^2 est égal à 0,96. Le coefficient directeur de la droite est de 0,91 avec une ordonnée à l'origine égale à 1,6.

La nappe de capteurs de pression est donc utilisée pour la suite de l'étude, c'est-à-dire avec les différents genoux artificiels étudiés et avec les sujets humains.

3.2 Comparaison de la pression maximale avec les valeurs des capteurs de force

La figure 10 donne pour un panel de genouillères, les valeurs de pression obtenues avec la nappe de capteurs de pression au niveau des 3 positions de mesure définies par la norme, ainsi que la valeur maximale.

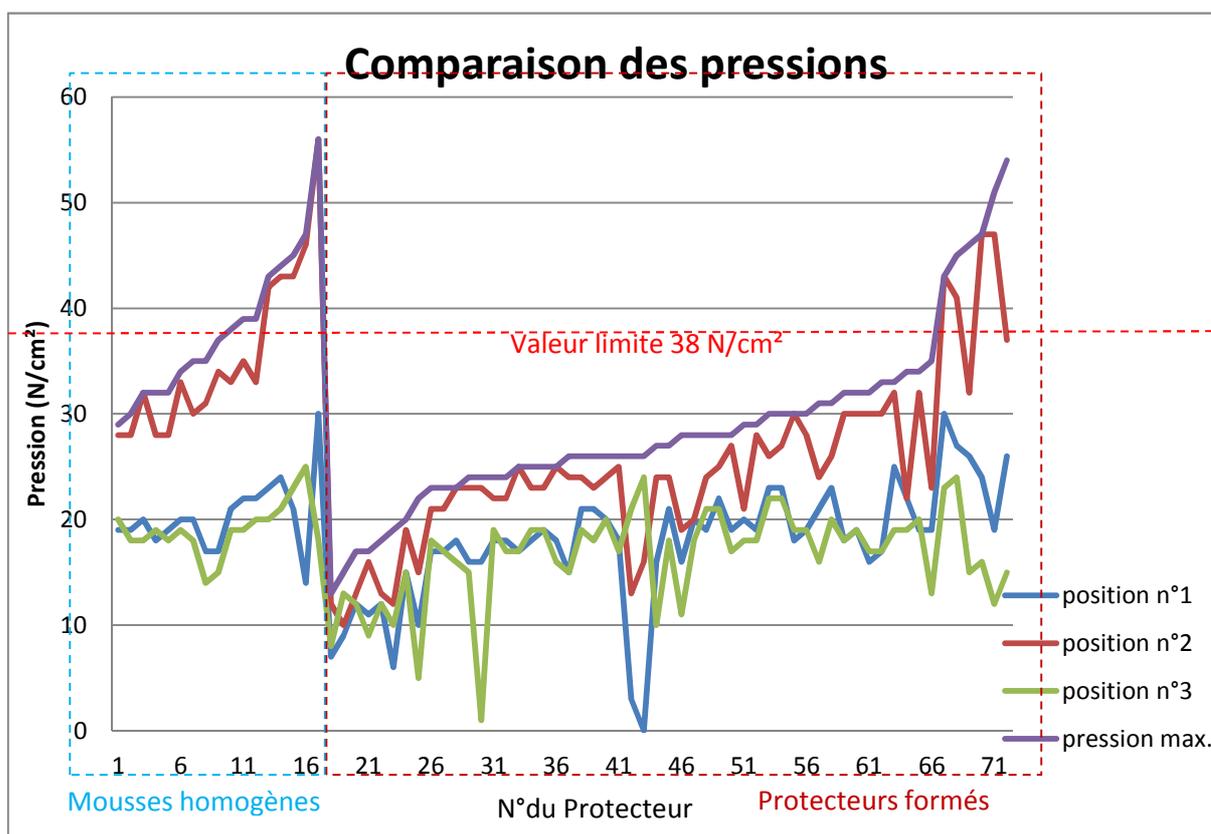


Figure 10 : comparaison de la pression maximale avec les pressions aux positions définies par la norme.

La valeur maximale de la pression est très souvent supérieure aux valeurs mesurées aux 3 positions définies par la norme.

Les protecteurs numérotés de 1 à 17 sont des plaques de mousse homogène d'épaisseur constante, la pression maximale se situe en général proche du capteur n°2. Pour les autres protecteurs des genoux numérotés de 18 à 71, les surfaces comportent par exemple des rainures profondes, des bosses ou des trous et la pression maximale peut se situer à des positions différentes des positions de mesures définies par la norme.

Ces courbes confirment que les positions de mesure spécifiées par la norme ne permettent pas d'avoir la garantie de trouver la valeur maximale quel que soit le protecteur. Pour la majorité des produits il n'y a pas de remise en cause de leur conformité : sur 72 protecteurs testés, 13 % sont non conformes en appliquant le protocole d'essai défini par la norme alors que 18 % seraient non conformes en prenant en compte la pression maximale. Les 3 protecteurs pour lesquels la conformité est remise en cause sont les échantillons n°12, 69 et 72 : ils comportent des rainures importantes pour améliorer leurs souplesses. Si lors de la mesure, la genouillère se trouve positionnée de telle sorte que la rainure soit en face des capteurs, la pression mesurée est très faible et sous-estime la pression réelle sur le genou.

La force relevée au niveau du capteur 1 (cf. figure 1) est systématiquement inférieure à celle du capteur 2 ou du capteur 3. La pression nulle obtenue dans la zone du capteur n°1 avec le protecteur n°43 est due à sa forme particulière qui élimine l'appui à l'avant du genou et le déplace au niveau du tibia.

3.3 Représentativité du genou

3.3.1 Genoux artificiels représentatifs de différentes tailles

Les dimensions des genoux scannés varient de manière importante.

A partir de la numérisation de 40 genoux réels, trois genoux moyens représentatifs de grande, moyenne et petite tailles ont été fabriqués. Le choix des 20 plus petits et des 20 plus grands genoux a été réalisé à partir de l'espace entre les condyles. Il était compris entre 8 et 12 cm. A la suite de la fabrication de ces 3 genoux, un genou aux formes simplifiées et facilement réalisable a été défini pour un coût faible (inférieur à 150 €).

La figure 11 donne un exemple de genou modélisé.

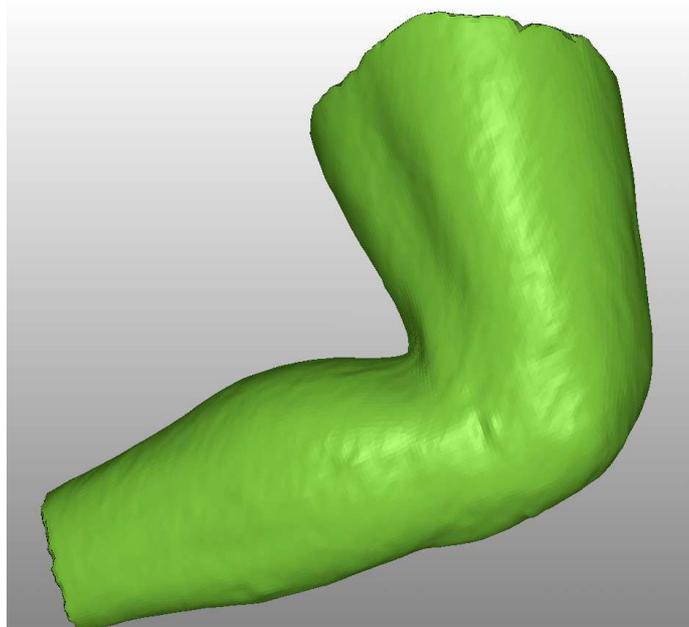


Figure 11 : exemple de genou modélisé.

3.3.2 Mesures comparatives avec les 3 genoux et le genou simplifié

Les mesures comparatives de pression maximale en fonction des différents genoux sont déclinées selon les deux grandes familles de protecteurs.

Mesures de la répartition de l'effort sur des mousses planes d'épaisseur constante

Le tableau 2 donne la pression maximale relevée lors de la mesure sur les différents mousses avec les genoux de différentes tailles et avec le genou simplifié en appliquant la force de 750 N.

| Référence des mousses | Pression maximale (N/cm ²) | | | |
|-----------------------|--|-------------|-------------|-----------------|
| | Gros genou | Genou moyen | Petit genou | Genou simplifié |
| 1 | 38 | 45 | 58 | 52 |
| 2 | 15 | 18 | 24 | 21 |
| 3 | 21 | 25 | 32 | 29 |
| 4 | 12 | 14 | 19 | 17 |
| 5 | 13 | 16 | 22 | 19 |
| 6 | 11 | 13 | 17 | 15 |
| 7 | 18 | 22 | 31 | 27 |
| 8 | 16 | 20 | 29 | 22 |
| 9 | 17 | 20 | 30 | 22 |
| 10 | 16 | 20 | 31 | 22 |

Tableau 2 : pressions maximales obtenues avec les différents genoux pour une force d'appui de 750 N.

Le tableau 3 donne les ratios des pressions maximales obtenues avec les différents genoux, en les comparant deux à deux, lors de la mesure sur les différentes mousses. La force d'appui était de 750 N.

| Référence des mousses | Ratio des pressions maximales obtenues avec les différents genoux | | | | | |
|-----------------------|---|-------------|------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Moyen/Gros | Petit/Moyen | Petit/Gros | Simplifié/Gros | Simplifié/Moyen | Simplifié/Petit |
| 1 | 1,18 | 1,29 | 1,53 | 1,37 | 1,16 | 0,90 |
| 2 | 1,20 | 1,33 | 1,60 | 1,40 | 1,17 | 0,88 |
| 3 | 1,19 | 1,28 | 1,52 | 1,38 | 1,16 | 0,91 |
| 4 | 1,17 | 1,36 | 1,58 | 1,42 | 1,21 | 0,89 |
| 5 | 1,23 | 1,38 | 1,69 | 1,46 | 1,19 | 0,86 |
| 6 | 1,18 | 1,31 | 1,55 | 1,36 | 1,15 | 0,88 |
| 7 | 1,22 | 1,41 | 1,72 | 1,50 | 1,23 | 0,87 |
| 8 | 1,25 | 1,45 | 1,81 | 1,38 | 1,10 | 0,76 |
| 9 | 1,18 | 1,50 | 1,76 | 1,29 | 1,10 | 0,73 |
| 10 | 1,25 | 1,55 | 1,94 | 1,38 | 1,10 | 0,71 |
| Moyenne | 1,21 | 1,39 | 1,67 | 1,39 | 1,16 | 0,84 |
| Ecart type | 0,03 | 0,09 | 0,14 | 0,06 | 0,05 | 0,07 |

Tableau 3 : comparaison des pressions maximales obtenues avec les différents genoux pour une force d'appui de 750 N.

Nous pouvons remarquer que les mousses conformes selon la norme restent conformes quel que soit le genou artificiel utilisé et la mousse n°1 non conforme avec le gros genou reste non conforme avec les 3 autres.

Pour une même force d'appui, la pression maximale est fonction de la taille du genou : elle est d'autant plus forte que la taille du genou est petite. Ceci s'explique par la surface d'appui plus réduite lorsque la taille du genou diminue.

Les figures de 19 à 24 en annexe 5 comparent 2 à 2 les 4 genoux. Quels que soient les genoux, y compris le genou simplifié, la corrélation entre les valeurs de la pression maximale relevées sur les différentes mousses avec les différents genoux est élevée : le coefficient de corrélation R² est supérieur à 0,95.

Les pressions relevées avec le genou simplifié se situent entre celles des petit et moyen genoux.

Considérant que la force d'appui est fonction de la morphologie des sujets, des mesures ont été réalisées en modulant la force d'appui en fonction de la taille des genoux. Le tableau 4 donne la force à appliquer sur les différents genoux pour obtenir la même pression maximale, correspondant à celle relevée sur le gros genou avec une force d'appui de 750 N.

| Référence des mousses | Pression maximale (N/cm ²) | Force d'appui (N) | | | |
|-----------------------|--|-------------------|-------------|-------------|-----------------|
| | | Gros genou | Genou moyen | Petit genou | Genou Simplifié |
| 1 | 41 | 750 | 650 | 470 | 580 |
| 2 | 16 | 750 | 620 | 440 | 570 |
| 3 | 23 | 750 | 610 | 450 | 560 |
| 4 | 12 | 750 | 580 | 430 | 540 |
| 5 | 14 | 750 | 610 | 400 | 530 |
| 6 | 12 | 750 | 600 | 440 | 540 |
| 7 | 19 | 750 | 610 | 440 | 540 |
| 8 | 16 | 750 | 620 | 410 | 580 |
| 9 | 17 | 750 | 640 | 430 | 580 |
| 10 | 17 | 750 | 620 | 420 | 580 |

Tableau 4 : comparaison des forces d'appui sur les différents genoux pour une pression maximale égale.

Le tableau 5 donne :

- d'une part, les forces théoriques qu'il faudrait appliquer sur les genoux des différentes tailles pour tenir compte du poids moyen des sujets correspondant à cette taille. Elles ont été calculées en prenant comme référence la valeur de 750 N de la norme, correspondant au gros genou (poids moyen 82 kg), puis pour les deux autres genoux en faisant une règle de 3 : $F = 750 \text{ N} * \text{Poids moyen} / 82$.
- d'autre part, la force moyenne à appliquer sur les différents genoux pour obtenir une même pression maximale. Ces valeurs sont reprises du tableau 4.

| | | Poids moyen (kg) | Force théorique (N) | Force moyenne mesurée (N) |
|-------------|-----------------------|------------------|---------------------|---------------------------|
| Petit genou | 20 plus petits sujets | 61kg | 550 | 433 |
| Genou moyen | Ensemble des sujets | 71kg | 650 | 616 |
| Gros genou | 20 plus gros sujets | 82 kg | 750 | 750 |

Tableau 5 : comparaison entre les forces théoriques à appliquer sur les différents genoux et la force donnant une même pression maximale.

Pour le petit genou, le tableau 5 montre que l'effort théorique à appliquer est de 550 N, si la force de 750 N est corrigée au prorata du poids moyen des sujets correspondant à ce genou ($750 \text{ N} * 61 \text{ kg} / 82 \text{ kg} = 550 \text{ N}$). Cet effort est supérieur à celui appliqué sur le petit genou pour avoir une pression équivalente à celle mesurée avec le gros genou avec 750 N : selon les genouillères il varie entre 400 et 470 N.

Pour le genou moyen, nous observons la même chose : la force théorique de 650 N pour des forces mesurées variant entre 580 et 650 N.

Cela signifie que si la taille du genou diminue, même si la force d'appui est réduite pour être proportionnelle aux poids des sujets correspondants, la réduction de la surface d'appui est telle que la pression maximale relevée est supérieure à celle d'un genou de taille supérieure.

Toutes proportions gardées, les mesures avec un genou plus petit et une force d'appui moindre donnent des pressions supérieures à celles avec un genou plus gros avec une force d'appui supérieure.

Mesures de la répartition de l'effort sur des genouillères formées

Les figures en annexe 6 donnent la corrélation entre les pressions d'appui obtenues avec les différents genoux sur l'échantillonnage de genouillères formées.

a) Pression maximale

Les figures 25 à 30 en annexe 6a montrent la corrélation :

- entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de différentes tailles,
- entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de différentes tailles et le genou simplifié.

La corrélation entre les genoux de grande et moyenne tailles et le genou simplifié est relativement bonne : le coefficient R^2 est de l'ordre de 0,8 à 0,9. Les coefficients directeurs des droites de régression linéaire sont proches de 1.

En revanche, la corrélation avec le petit genou et les 3 autres est plutôt médiocre, les valeurs de R^2 descendent jusqu'à 0,6 et les coefficients directeurs des droites de régression linéaire peuvent atteindre 0,4. La forme plus anguleuse du petit genou explique une répartition différente de la force d'appui.

b) Pressions relevées au niveau des positions définies dans la norme

De la même façon, des analyses ont permis de comparer les pressions relevées aux 3 positions de mesure de la norme, avec les différents genoux.

Les figures de 31 à 48 en annexe 6b à 6d montrent la corrélation :

- entre les pressions obtenues avec les genoux de différentes tailles, relevées aux 3 positions de mesure définies dans la norme,
- entre les pressions obtenues avec les genoux de différentes tailles et le genou simplifié, relevées aux 3 positions de mesure définies dans la norme.

Les figures 31 à 36 en annexe 6b donnent la corrélation à la position de mesure 2.

Les figures 37 à 42 en annexe 6c donnent la corrélation à la position de mesure 1.

Les figures 43 à 48 en annexe 6d donnent la corrélation à la position de mesure 3.

Au niveau du capteur 2, les corrélations sont correctes : les coefficients R^2 des droites de comparaison des pressions mesurées avec différents genoux varient de 0,8 à 0,9. En particulier, les coefficients a et b de la droite de régression linéaire entre les genoux moyen et simplifié sont proches de 1 : le genou simplifié donne des valeurs comparables à celles avec le genou moyen. Cette bonne corrélation s'explique par le fait qu'en général, la position de ce capteur correspond au premier point d'appui du genou.

Au niveau des capteurs 1 et 3 les corrélations sont plus faibles, les coefficients R^2 varient de 0,4 à 0,9. Cela peut s'expliquer par une répartition de la pression fonction des formes respectives de la genouillère et du genou. Ceci est notamment observé sur certaines genouillères présentant un renfort particulièrement important au niveau du tibia pour limiter l'appui au niveau de la rotule du genou. Cela entraîne un déplacement des points d'appui qui d'un genou à l'autre est variable spécialement avec le petit genou qui présente une forme plus anguleuse et plus bosselée.

Ces corrélations montrent que globalement, le genou simplifié donne des pressions dans les gammes de celles relevées avec les autres genoux.

En conclusion, l'utilisation du genou simplifié peut être envisagée plutôt qu'un genou artificiel moyen représentatif.

3.4 Validation de la spécification de la norme

Choix de la position d'essai

Le tableau 7 en annexe 7 montre la répartition du poids sur chacun des genoux en fonction de la position adoptée par les sujets d'essai. Pour les positions P1 à P4, les relevés sont effectués simultanément sur les genoux droit et gauche. Les relevés P5 et P6 correspondent à 2 positions successives, avec appui d'abord sur le genou droit, ensuite sur le genou gauche.

L'avant dernière colonne donne le pourcentage du poids en appui sur le genou par rapport au poids total de l'individu. Selon les positions, le poids au niveau des genoux peut représenter entre 20 à 60 % du poids du sujet.

La dernière colonne donne l'écart type de ce pourcentage sur les 12 mesures. Cette dernière information permet de mettre en évidence la variation du poids sur la balance, c'est-à-dire la difficulté de la part du sujet d'essai à reproduire la position.

La position pour effectuer les essais subjectifs a été choisie selon 3 critères :

- le pourcentage du poids sur le genou le plus grand possible,
- la position la plus stable possible, c'est-à-dire entraînant le moins d'écart entre les valeurs obtenues avec le genou gauche ou droit,
- la position la plus répétable par les différents sujets, c'est-à-dire quand l'écart type par genou est le plus faible.

La position 2 a été retenue car elle donne l'écart type le plus faible, avec un poids sur les genoux proche de 50 % du poids de l'individu. Elle correspond au buste et jambes perpendiculaires au sol, les bras le long du corps et la tête droite.

A noter que la valeur de la force d'appui de 750 N spécifiée par la norme correspond à l'effort sur le genou d'un individu d'environ 120 kg en position agenouillée sur un genou conformément à la position n°5.

Evaluation des genouillères

Les tableaux 8 à 17 en annexe 8 donnent, pour les 10 genouillères testées, les pressions maximales relevées au niveau des genoux des sujets d'essai lors des essais subjectifs et l'évaluation du confort par les sujets d'essai. La valeur de la pression maximale mesurée sur banc d'essais avec la nappe est rappelée en 1ère ligne des tableaux.

La figure 12 donne un exemple d'une mesure de la répartition de la pression sur le genou avec la nappe de capteurs de pression. La nappe comprend 32 lignes et 32 colonnes de capteurs. Dans cette représentation graphique, le niveau de pression est donné par différentes couleurs. Sur cet exemple, la pression maximale est comprise entre 20 et 25 N/cm².

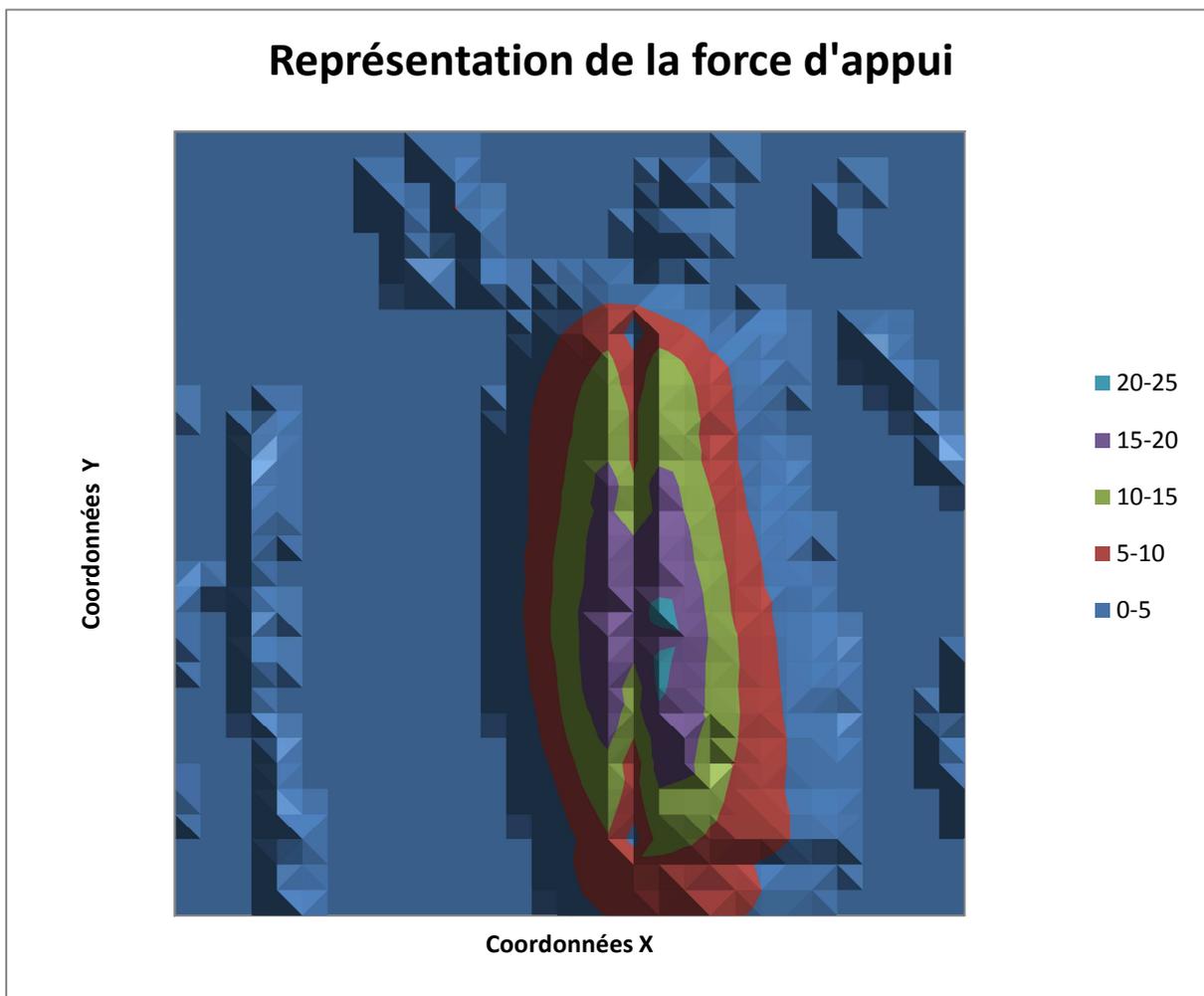


Figure 12 : exemple de représentation de la répartition de la force d'appui.

La figure 13 présente la comparaison du confort ressenti par les sujets d'essai par rapport à la pression maximale relevée sur leur genou pour chaque sujet et pour les 10 protecteurs choisis. Les lignes verticales montrent la pression maximale mesurée sur le protecteur avec le banc d'essai proposé par la norme.

La limite à partir de laquelle les évaluations du ressenti du confort par les sujets sont considérés comme acceptables est fixée à 5. Cette limite a été définie arbitrairement. Cette information n'a pas été donnée aux sujets d'essais.

Afin de leur donner des repères, le premier protecteur qu'ils évaluaient donnait de très bonnes valeurs de répartition de la force selon l'essai normalisé et le second de très mauvaises. Les sujets étaient libres de les évaluer sur une échelle de 0 à 10.

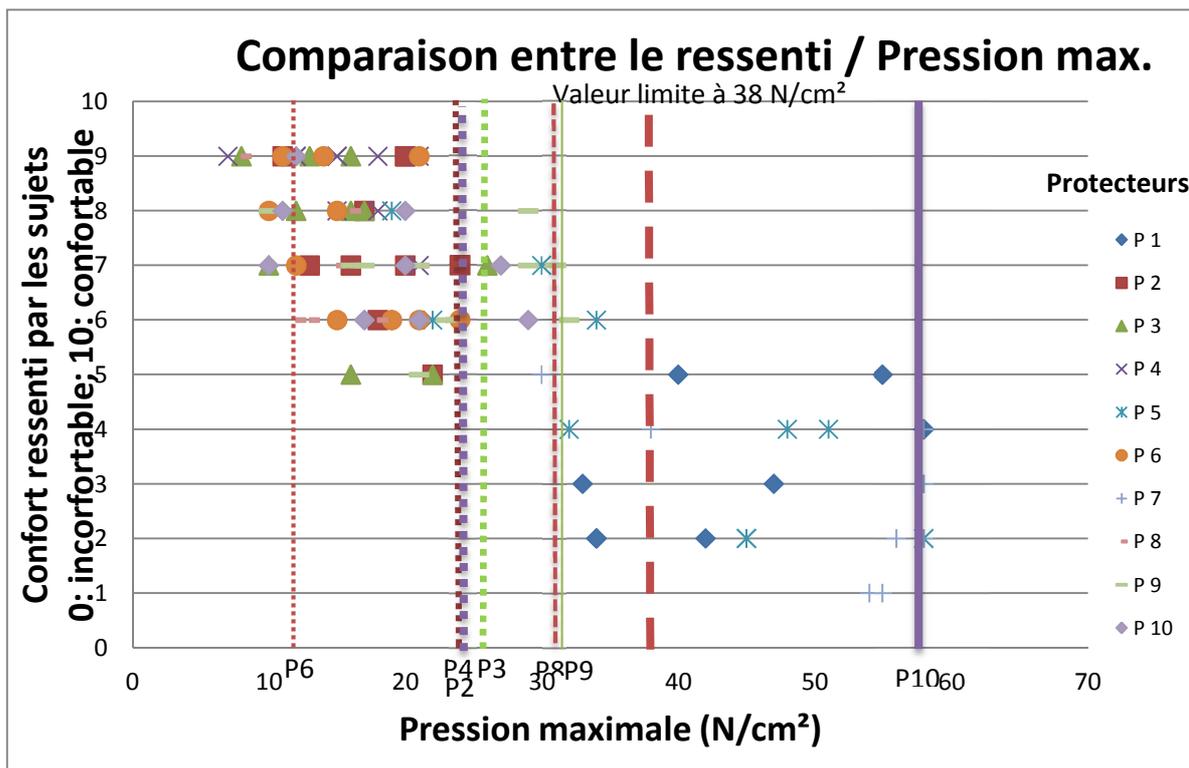


Figure 13 : comparaison du ressenti et de la pression maximale.

Les 3 protecteurs P1, P5 et P7 estimés mauvais par les sujets d'essais donnent avec les genoux des sujets, des valeurs de pression importantes comprises entre 19 et 58 N/cm² (58 N/cm² étant la pression maximale qu'il est possible de mesurer avec la nappe de capteurs de pression) et des moyennes comprises entre 38 et 53 N/cm². Les pressions mesurées sont donc cohérentes avec le ressenti des sujets qui les évaluent comme inconfortables. Par ailleurs, lorsque ces trois protecteurs sont mesurés sur banc d'essai avec les capteurs de force définis par la norme, ils donnent des pressions maximales comprises entre 85 et 145 N/cm² et sont donc non conformes selon la norme EN 14404. Ces valeurs sortent des limites de la figure.

Pour les 6 genouillères P2, P3, P4, P6, P8 et P9, les sujets les ont estimées confortables. Les pressions mesurées avec les sujets sont inférieures à 38 N/cm² sauf une mesure avec un sujet qui est de 50 N/cm². Les valeurs obtenues sur le banc d'essai normalisé sont également inférieures à 38 N/cm².

Le protecteur P10 est non conforme selon la norme, mais est évalué plutôt confortable par les sujets d'essais. La pression maximale mesurée lors des essais subjectifs est de 37 N/cm². Bien que la mousse du protecteur P10 soit de faible épaisseur et de qualité moyenne, la coque extérieure rigide formée pour épouser l'ensemble du genou procure une sensation de protection et de confort important, ce qui a conduit les sujets à bien noter cette genouillère.

En revanche lors de l'essai normalisé, la qualité et la faible épaisseur de mousse à l'intérieur de la coque entraîne une répartition de la force plutôt moyenne. La répartition de la force est affectée par la coque qui génère des points durs en particulier au centre de la rotule, c'est-à-dire au niveau du capteur n°2. De plus la force de 750 N appliquée sur le genou, correspond comme dit précédemment à l'effort sur le genou d'un individu d'environ 120 kg en position agenouillé sur un genou, situation extrême qui n'a pas été atteinte lors des essais avec les sujets d'essai. La pression mesurée lors de l'essai normalisé est alors largement supérieure à celle relevée sur les genoux des sujets.

4 Discussion et conclusions

L'objectif de cette étude était d'analyser la pertinence des paramètres d'essai suivants :

- les positions des 3 points de mesure de la force d'appui,
- le genou artificiel défini dans la norme,
- la valeur limite de 30 N, pour des capteurs de force dont la surface de mesure est un disque de 1 cm de diamètre.

4.1 Position des points de mesure

Un moyen de mesure a été défini, permettant de mesurer la répartition de la force d'appui sur le genou, que ce soit avec les genoux artificiels ou avec les sujets d'essais. Le choix s'est orienté vers une nappe de capteurs de pression de 16 x 16 cm composée de 1024 capteurs de 5 x 5 mm de côté chacun. Ce système avait déjà été évalué lors d'une précédente étude. Le coefficient de corrélation linéaire R^2 entre les mesures obtenues avec les capteurs de force définis par la norme et celles de la nappe de capteurs de pression est supérieur à 0,95. Cette corrélation ne dépend pas du type de genouillère, ni de la position du capteur 1, 2 ou 3. Ce moyen de mesure permet de tracer une cartographie de la répartition de la pression sur le genou, et de déterminer la pression maximale quelle que soit sa position mais présente l'inconvénient d'être onéreux et de nécessiter un système d'acquisition et de traitement des données complexe. Il est donc possible d'utiliser la nappe de capteurs de pression, et en particulier avec les différents genoux artificiels étudiés et lors des essais avec sujets humains.

Une autre possibilité existe telle que des capteurs de force plats et souples avec une surface de l'ordre de celle des capteurs définis par la norme EN 14404 (cf. figure 50, annexe 9) permettent pour un coût modique d'effectuer la mesure en n'importe quel endroit du genou. Ils présentent l'inconvénient de nécessiter des mesures multiples pour trouver la pression maximale.

Les mesures effectuées avec cette nappe ont montré que pour les plaques en mousse plane et homogène, la pression maximale est souvent située au niveau du capteur n°2. En revanche dès que les protecteurs ont des formes comportant, par exemple des rainures ou des bosses afin de déplacer les points d'appui, la pression maximale peut se situer en dehors des 3 positions de mesures définies par la norme.

La différence entre la pression maximale et les mesures effectuées aux positions normalisées peut être importante selon les formes de genouillères : il est donc intéressant d'avoir la possibilité de mesurer cette pression sur toutes les positions du genou.

4.2 Genoux représentatifs

Trois genoux représentatifs de grande, moyenne et petite tailles ont été définis à partir de la numérisation de 40 genoux réels. Le genou de grande taille correspond au genou normalisé et est plutôt représentatif de la moitié de la population ayant les genoux les plus larges.

A la suite de la détermination de ces 3 genoux, un genou aux formes simplifiées et facilement réalisable a été défini. Il se compose de :

- un cylindre de diamètre 93 mm pour représenter la partie tibiale,
- un cylindre de diamètre 93 mm pour représenter la jambe. La partie jambe n'intervenant pas dans la répartition de la force d'appui, elle est donc simplifiée et a les mêmes formes et mêmes dimensions que la partie tibiale,
- un coude avec un rayon de courbure de 80 mm et un diamètre de 93 mm.

La comparaison des pressions maximales obtenues avec les 3 genoux représentatifs et le genou simplifié donne une bonne corrélation lorsque les mesures sont réalisées sur des

mousses planes alors que celle-ci devient moyenne avec des protecteurs de formes diverses.

Globalement, pour une même force d'appui, en fonction de la taille du genou, la pression est d'autant plus élevée que la taille du genou est petite. Ceci s'explique par la surface d'appui plus réduite lorsque la taille du genou diminue.

Lorsque la taille du genou diminue, même si la force d'appui est réduite pour être proportionnelle au poids des sujets correspondants, la réduction de la surface d'appui est telle que la pression maximale relevée est supérieure à celle d'un genou de taille supérieure. Toutes proportions gardées, les mesures avec un genou plus petit et une force d'appui moindre donnent des pressions supérieures à celles avec un genou plus gros avec une force d'appui supérieure. Nous pouvons donc noter qu'il n'était pas pertinent, dans la méthode normalisée, de prendre un genou de grande taille, qui répartit mieux les pressions par rapport à un genou plus petit, mais en contrepartie, la force d'appui spécifiée de 750 N semble majorée par rapport au poids réel d'appui sur le genou.

Les pressions obtenues avec le genou simplifié sont dans les gammes de celles relevées avec les autres genoux en particulier le genou moyen. Son utilisation peut donc être envisagée, à la place d'un genou artificiel difficile à fabriquer et non représentatif de la diversité des morphologies.

4.3 Valeur limite de la force d'appui

Une évaluation du confort d'un panel de 10 genouillères a été réalisée par des sujets d'essais, afin de valider la valeur limite de la force d'appui de 30 N spécifiée par la norme.

Cette évaluation du confort par les sujets d'essai par rapport à la pression mesurée a permis de vérifier que :

- 6 genouillères conformes à la norme étaient jugées confortables par les sujets,
- 4 genouillères jugées inconfortables par les sujets étaient non-conformes à la norme,
- 1 genouillère jugée confortable ne répondait pas aux spécifications de la norme. La force d'appui exercée lors des essais normalisés, supérieure à celles lors des essais subjectifs, peut être une des explications.

Elle permet de conclure que globalement, la limite spécifiée de 30 N pour un capteur dont la surface d'appui est un disque de 1 cm de diamètre est cohérente : elle permet de différencier les protecteurs reconnus confortables et adaptés par les sujets d'essais.

5 Bibliographie

- [1] Norme EN 14404 : 2010 : « Equipement de protection individuelle – Protection des genoux pour le travail à genoux ».
- [2] Centre de Recherche Suédois en Sécurité du Travail dans le Bâtiment (BYGGHÄLSAN), Communication du XX^{ème} Congrès International de Médecine du Travail, Le Caire, 25 septembre - 1er octobre 1981.
- [3] GONELLA M., LORTIE M., DENIS D. - Prévenir les risques dans les petites entreprises : intervenir grâce aux équipements de protection individuels chez les poseurs de revêtements de sol : in Journées de réflexion scientifique de l'Institut santé et société. La recherche intervention en santé à l'UQAM (23-24 avril 2007 : St-Paulin, Canada), référence de la bibliographie (cf. S-167), 2007.

Annexe 1

Schéma du genou artificiel défini dans la norme EN 14404

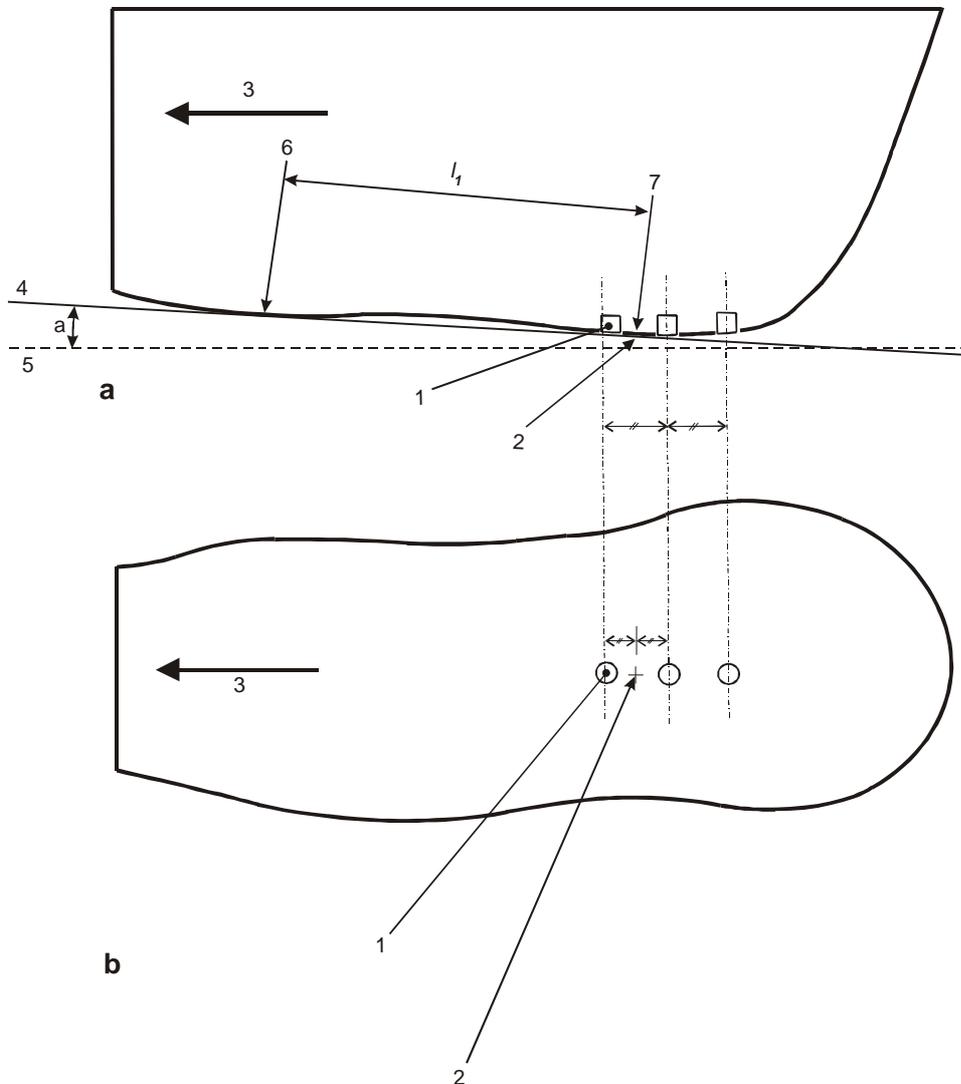


Figure 14 : position des capteurs de force sur le genou normalisé.

a : angle entre le plan incliné et le sol horizontal $5 \pm 0,5^\circ$
l1 distance entre le point 6 et 7 : 170 ± 30 mm
Distance entre les capteurs 25 ± 2 mm

Annexe 2

Caractéristiques des sujets d'essai

| sujet | poids (Kg) | sexe | taille (cm) |
|-------|------------|------|-------------|
| 1 | 73 | M | 177 |
| 4 | 73 | M | 168 |
| 5 | 58 | M | 178 |
| 6 | 81 | M | 167 |
| 7 | 70 | M | 177 |
| 8 | 75 | M | 176 |
| 9 | 65 | M | 164 |
| 10 | 78 | M | 182 |
| 11 | 72 | M | 186 |
| 12 | 86 | M | 184 |
| 13 | 83 | M | 186 |
| 14 | 126 | M | 181 |
| 16 | 63 | M | 177 |
| 17 | 67 | M | 190 |
| 18 | 82 | M | 180 |
| 19 | 74 | M | 179 |
| 24 | 83 | M | 179 |
| 25 | 84 | M | 186 |
| 26 | 112 | M | 179 |
| 27 | 97 | M | 186 |
| 31 | 69 | M | 184 |
| 38 | 86 | M | 184 |
| 39 | 68 | M | 188 |
| 2 | 54 | F | 157 |
| 3 | 70 | F | 172 |
| 15 | 53 | F | 162 |
| 20 | 65 | F | 170 |
| 21 | 57 | F | 160 |
| 22 | 51 | F | 165 |
| 23 | 60 | F | 157 |
| 28 | 62 | F | 164 |
| 29 | 72 | F | 171 |
| 30 | 51 | F | 161 |
| 32 | 68 | F | 165 |
| 33 | 66 | F | 169 |
| 34 | 60 | F | 168 |
| 35 | 73 | F | 173 |
| 36 | 56 | F | 165 |
| 37 | 51 | F | 162 |

Tableau 6 : caractéristiques des sujets d'essai.

Annexe 3

Schéma du genou simplifié

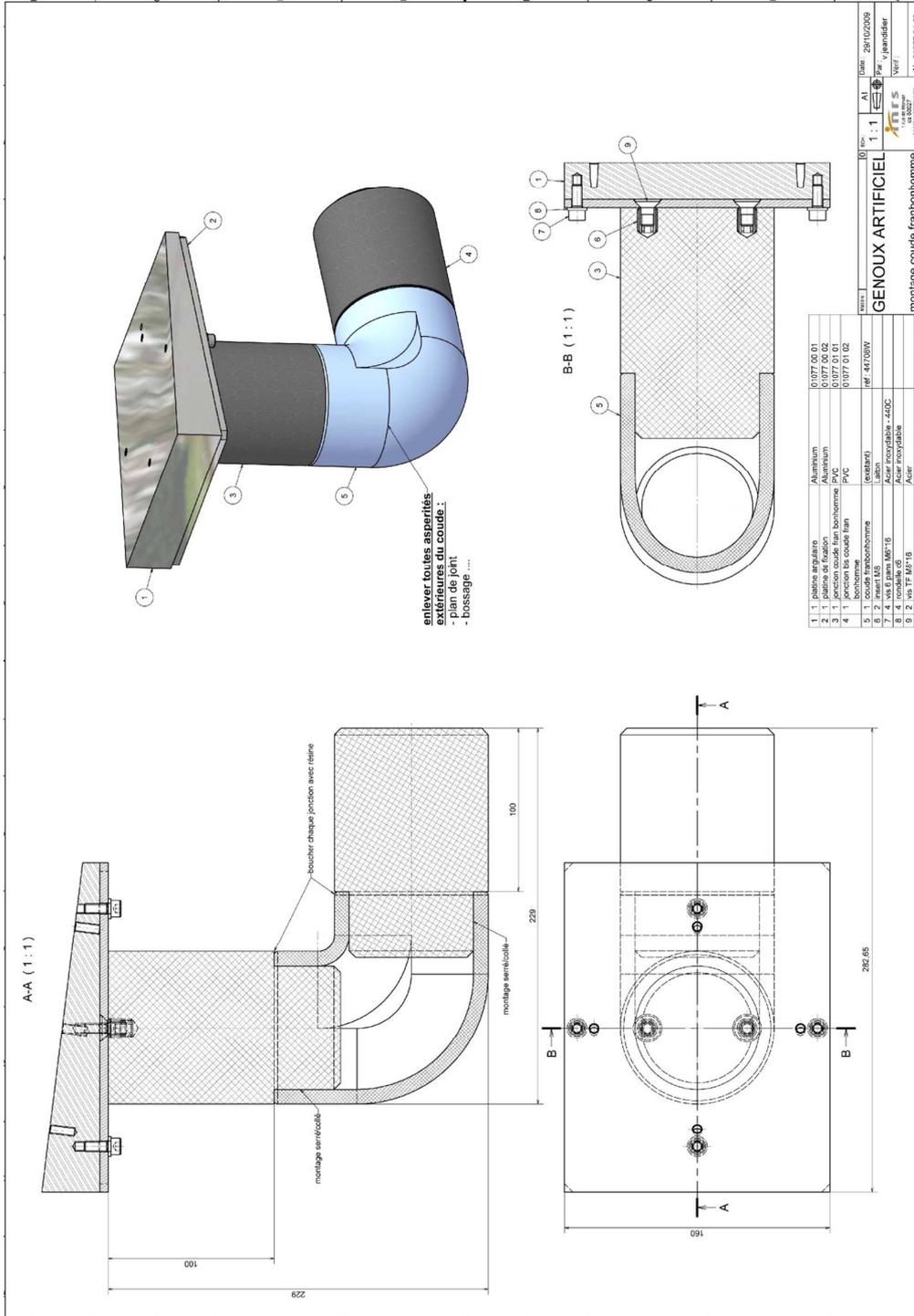


Figure 15 : schéma du genou simplifié.

Annexe 4

Comparaison des méthodes de mesure de la force (genou normalisé)

Les figures de l'annexe 4 donnent les corrélations entre les pressions d'appui obtenues avec les capteurs de force normalisés et ceux de la nappe de capteurs de pression, lors des mesures de genouillères de formes diverses avec le genou normalisé.

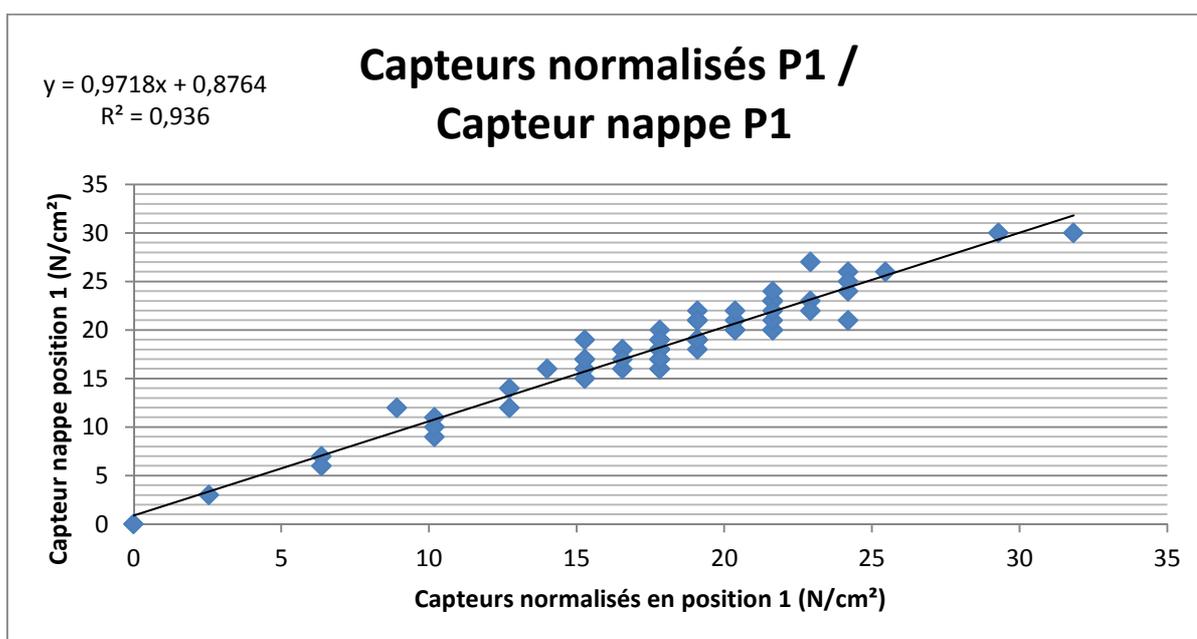


Figure 16 : comparaison du capteur normalisé position 1 avec le capteur de pression de la nappe à la même position.

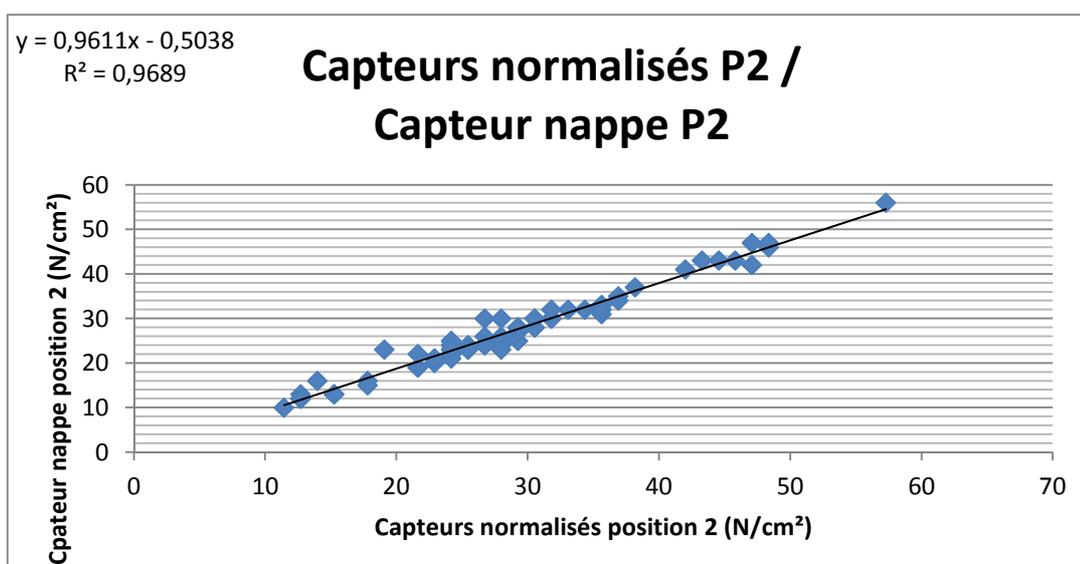


Figure 17 : comparaison du capteur de force normalisé position 2 avec le capteur de pression de la nappe à la même position.

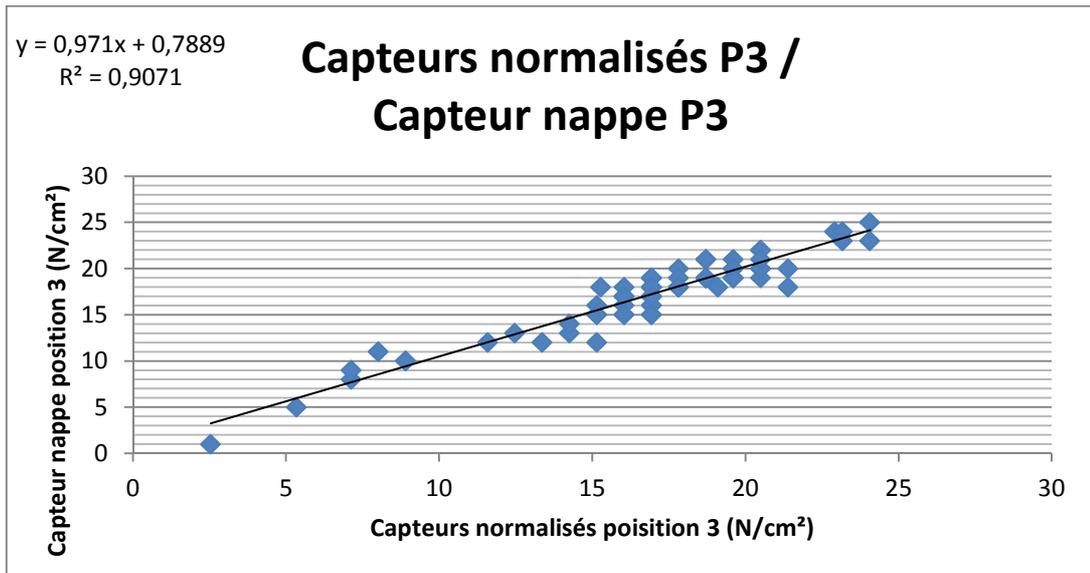


Figure 18 : comparaison du capteur de force normalisé position 3 avec le capteur de pression de la nappe à la même position.

Annexe 5

Pression maximale sur des mousses plates avec les 4 genoux

Les figures de l'annexe 5 donnent les corrélations entre les pressions maximales obtenues sur des mousses d'épaisseurs et de densité différentes avec les 4 genoux artificiels.

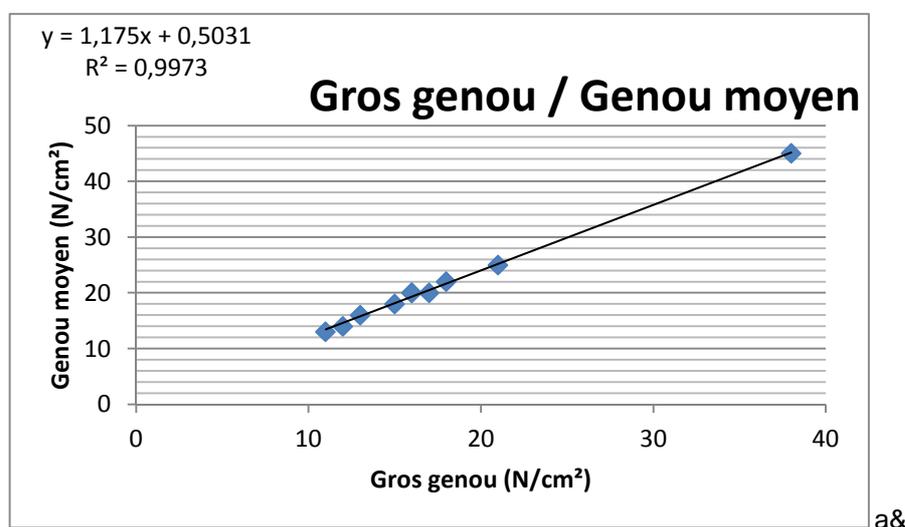


Figure 19 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de grande et moyenne tailles.

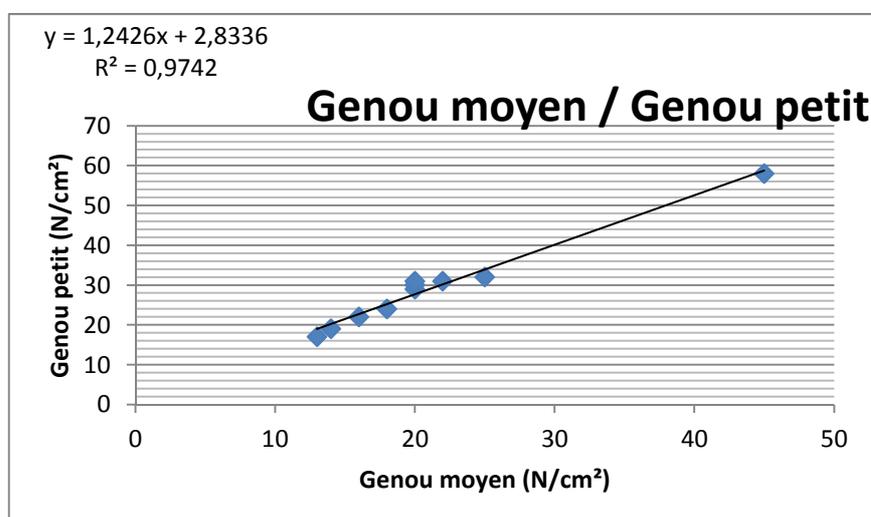


Figure 20 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de moyenne et petite tailles.

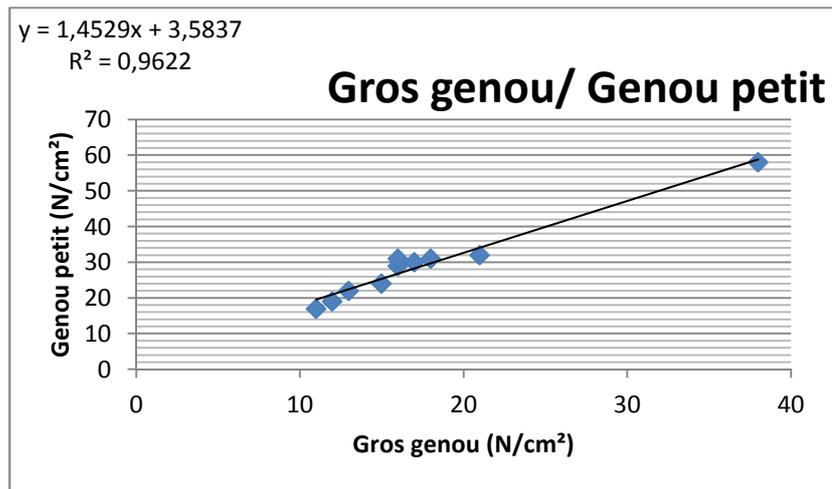


Figure 21 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de grande et petite tailles.

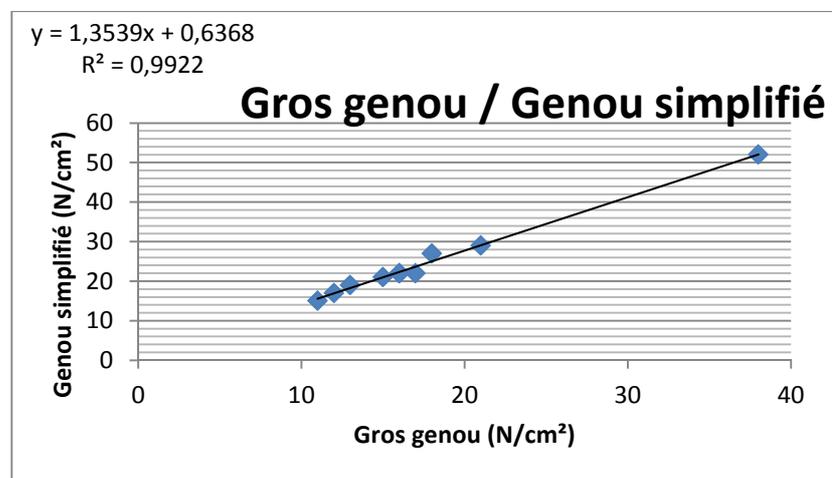


Figure 22 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec le genou de grande taille et le genou simplifié.

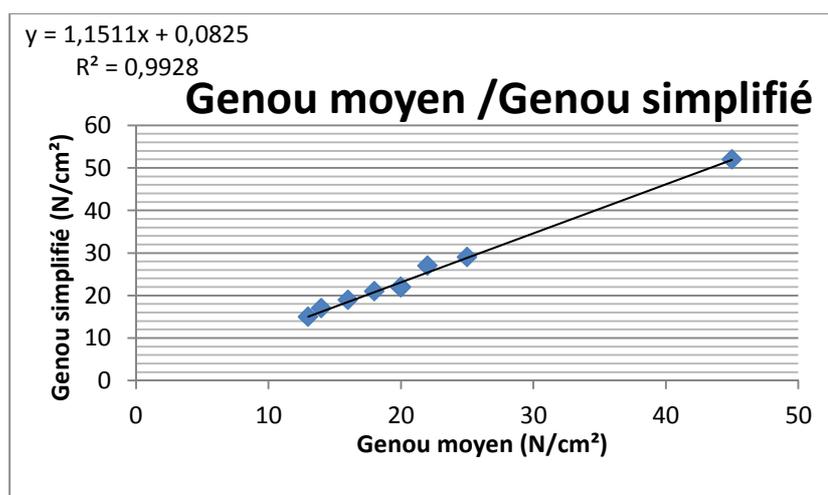


Figure 23 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec le genou de moyenne taille et le genou simplifié.

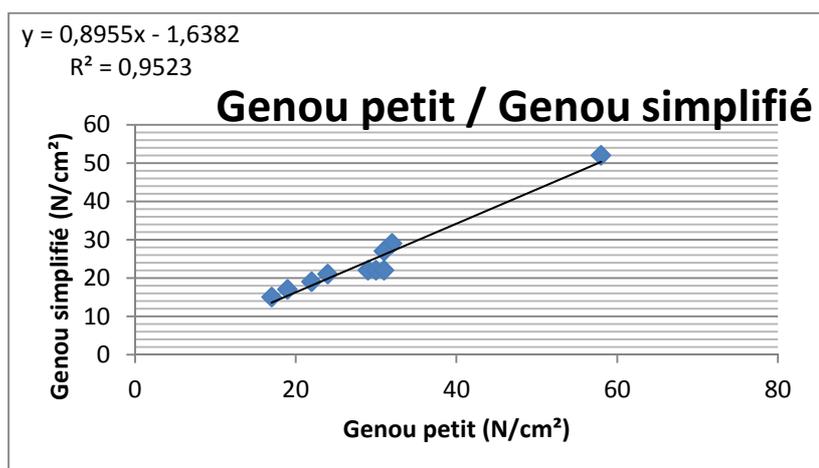


Figure 24 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec le genou de petite taille et le genou simplifié.

Annexe 6

Pressions maximales aux positions normalisées sur genouillères avec les 4 genoux

Les figures de l'annexe 6 donnent la corrélation entre les pressions maximales obtenues avec les différents genoux artificiels sur différents types de genouillères avec des formes et des systèmes de maintien divers.

Pression maximale :

Les figures 25 à 30, annexe 6a, montrent la corrélation :

- entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de différentes tailles,
- entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de différentes tailles et le genou simplifié.

Pression relevée au niveau des positions définies dans la norme :

Les figures 31 à 48 montrent la corrélation :

- entre les pressions obtenues avec les genoux de différentes tailles, relevées aux 3 positions définies dans la norme,
- entre les pressions obtenues avec les genoux de différentes tailles et le genou simplifié, relevées aux 3 positions définies dans la norme.

Annexe 6b : pression à la position du capteur 2

Annexe 6c : pression à la position du capteur 1

Annexe 6d : pression à la position du capteur 3

Annexe 6a

Pression maximale

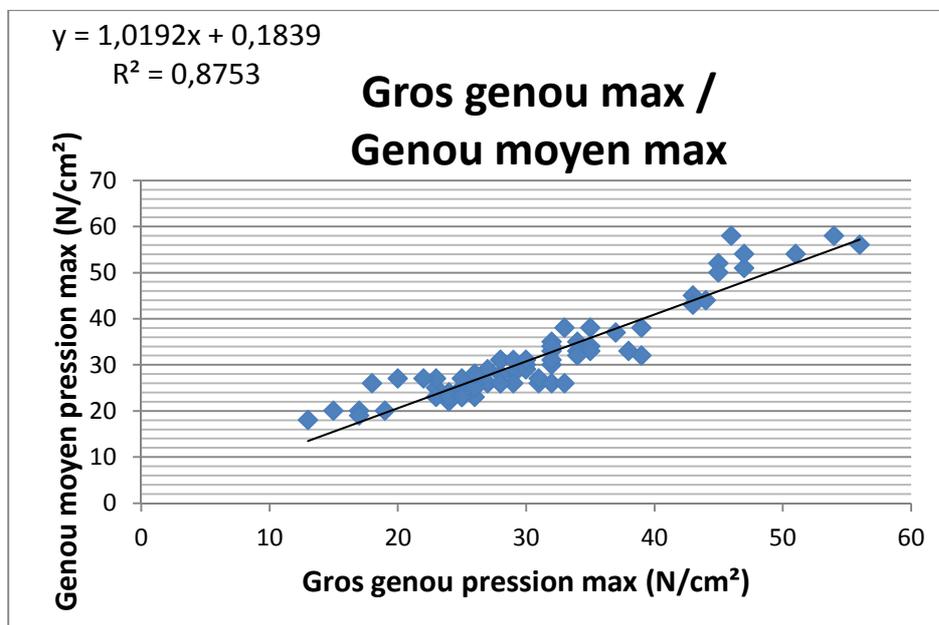


Figure 25: corrélation entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de grande et moyenne tailles.

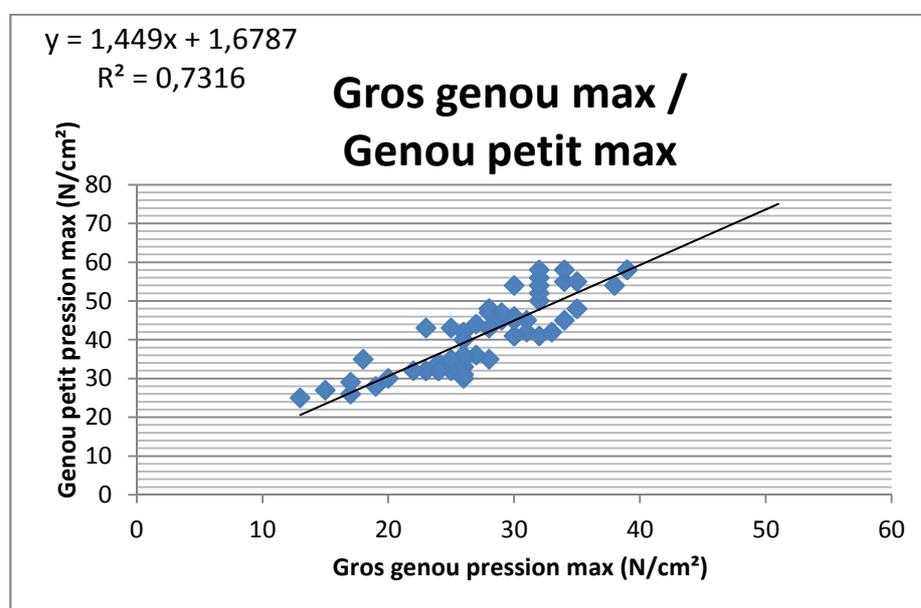


Figure 26 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de grande et petite tailles.

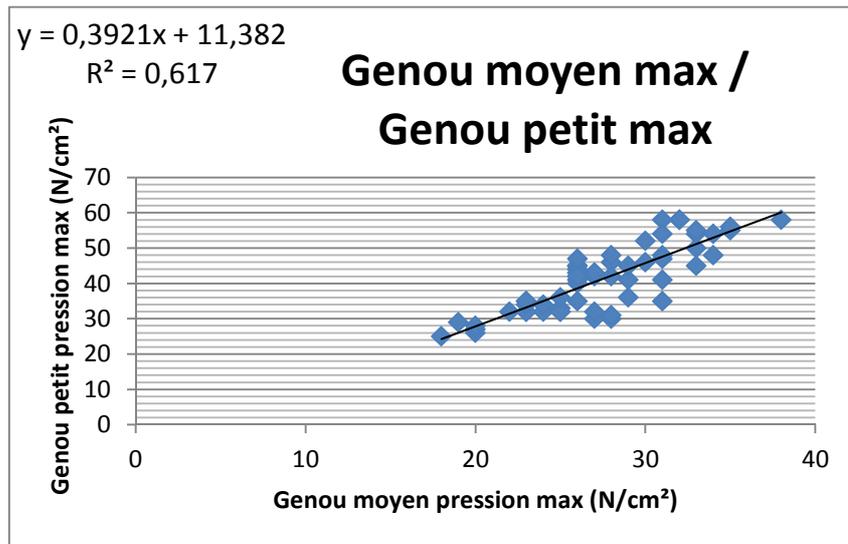


Figure 27 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec les genoux de moyenne et petite tailles.

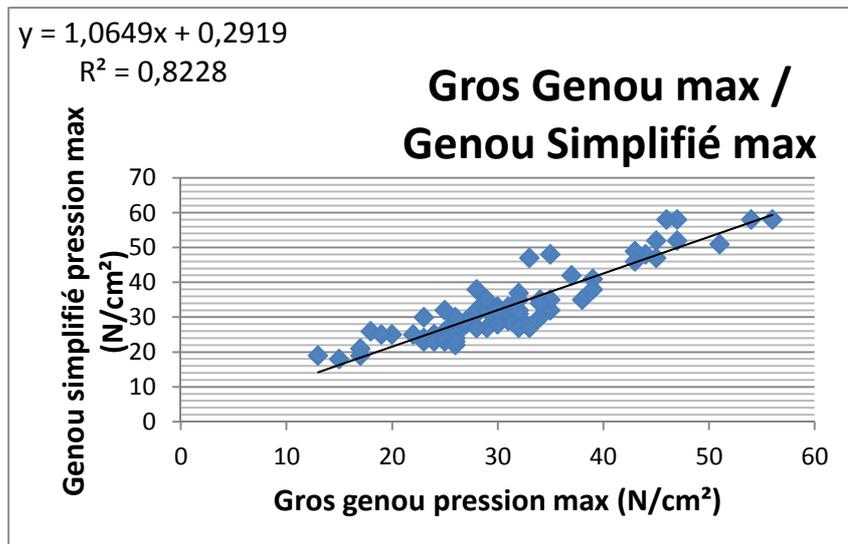


Figure 28 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec le genou de grande taille et le genou simplifié.

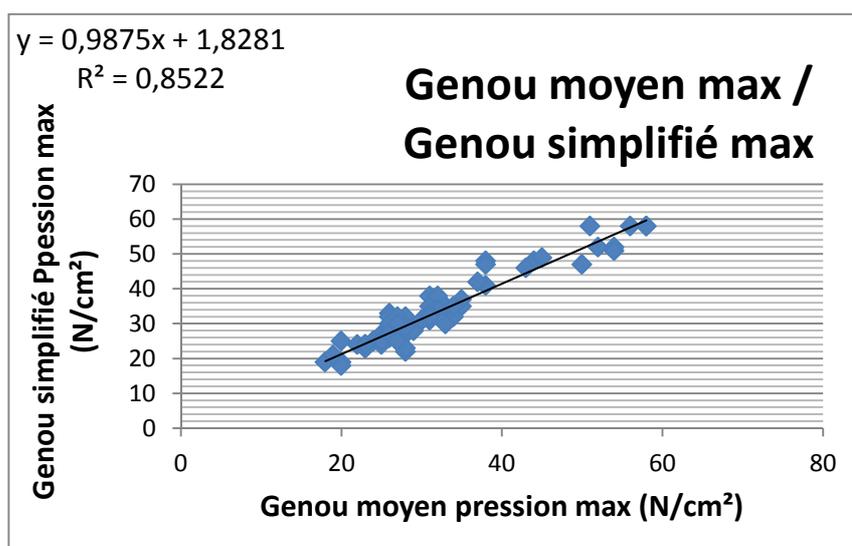


Figure 29 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec le genou de moyenne taille et le genou simplifié.

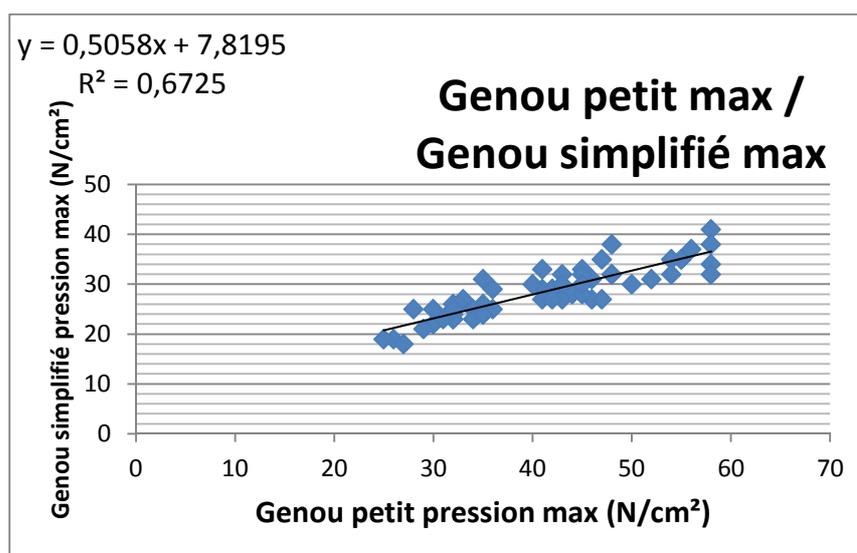


Figure 30 : corrélation entre les pressions maximales obtenues avec le genou de petite taille et le genou simplifié.

Annexe 6b

Pression à la position du capteur 2

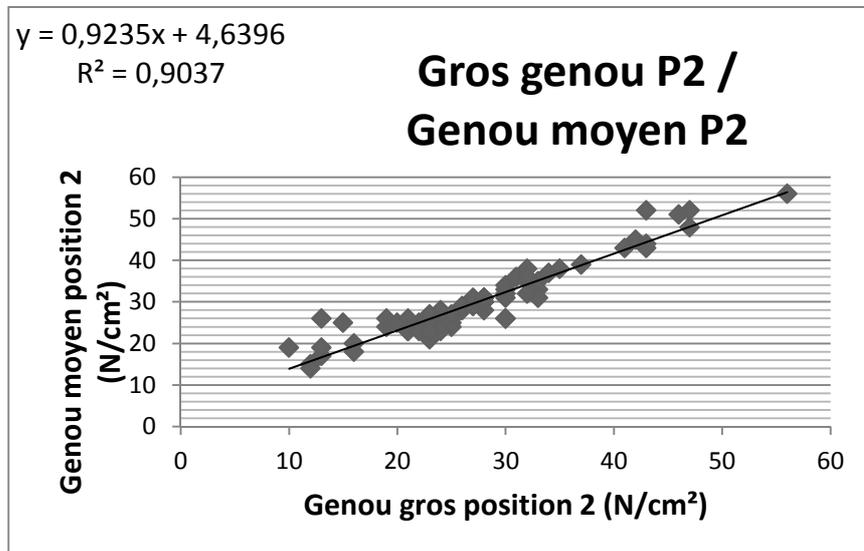


Figure 31 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°2 avec les genoux de grande et moyenne tailles.

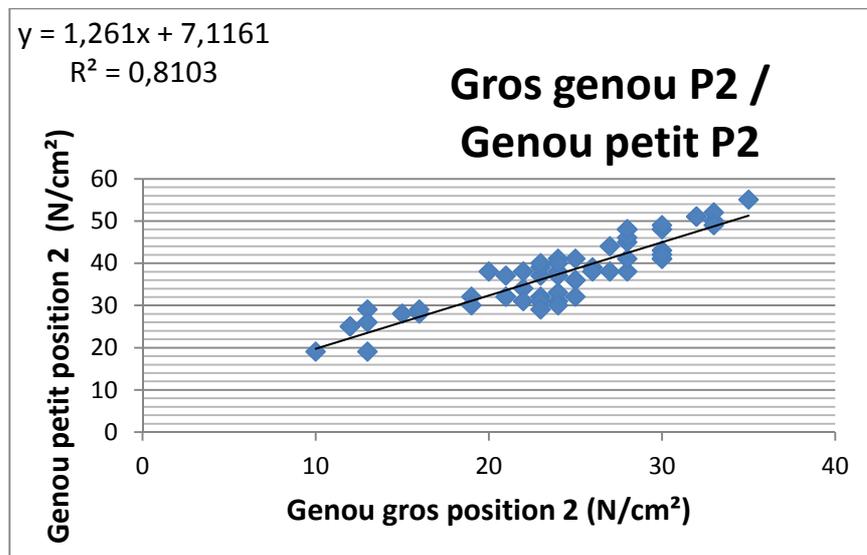


Figure 32 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°2 avec les genoux de grande et petite tailles.

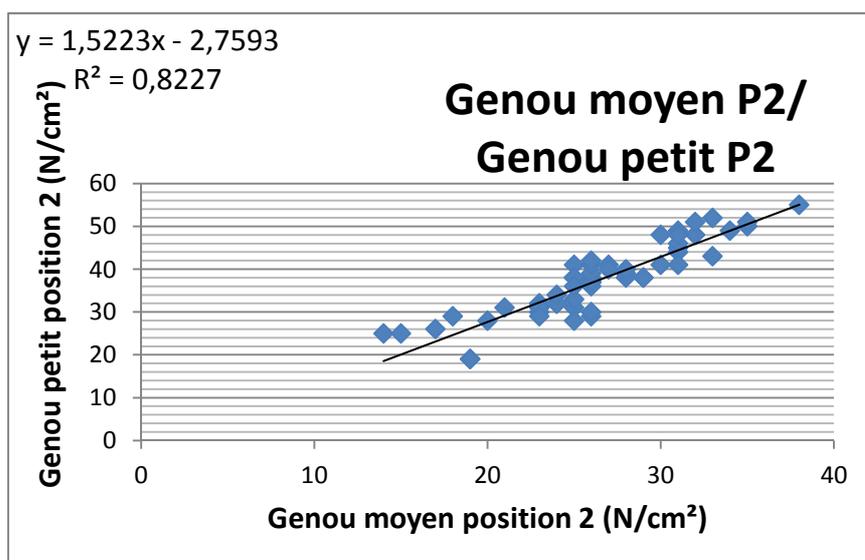


Figure 33 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°2 avec les genoux de moyenne et petite tailles.

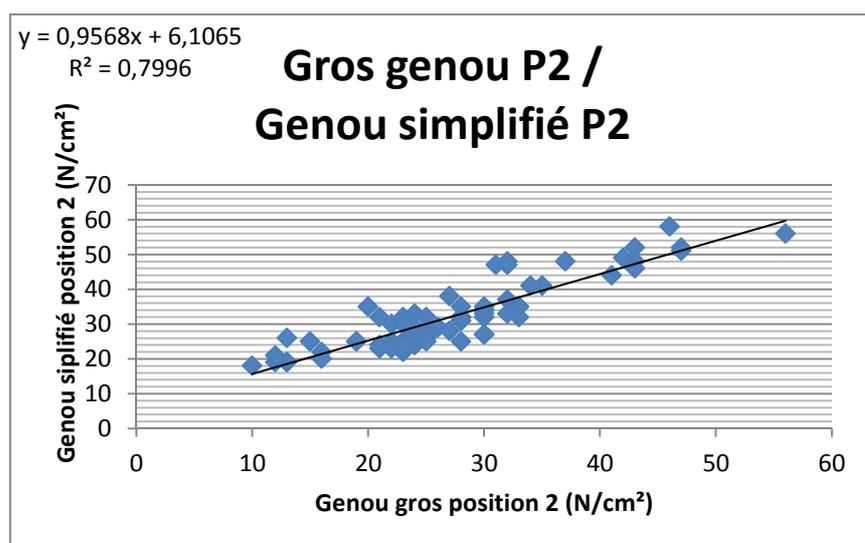


Figure 34 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°2 avec le genou de grande taille et le genou simplifié.

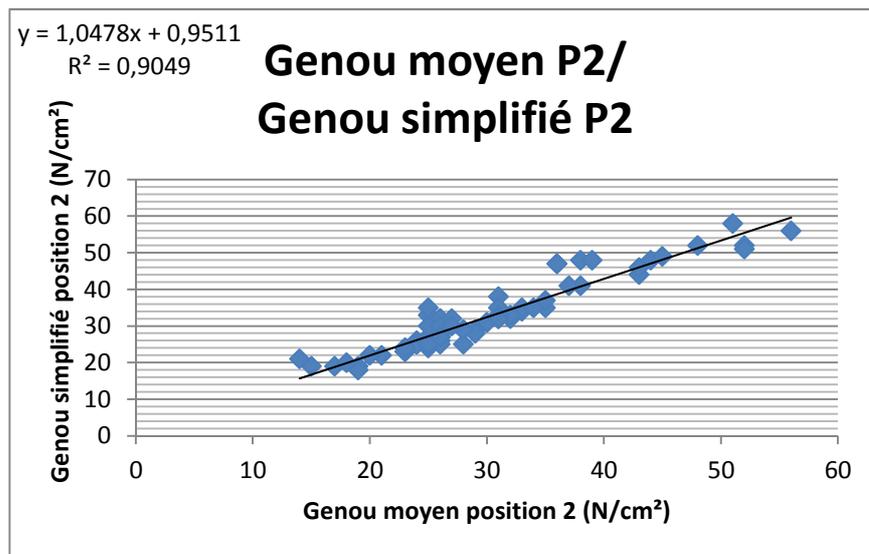


Figure 35 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°2 avec le genou de moyenne taille et le genou simplifié.

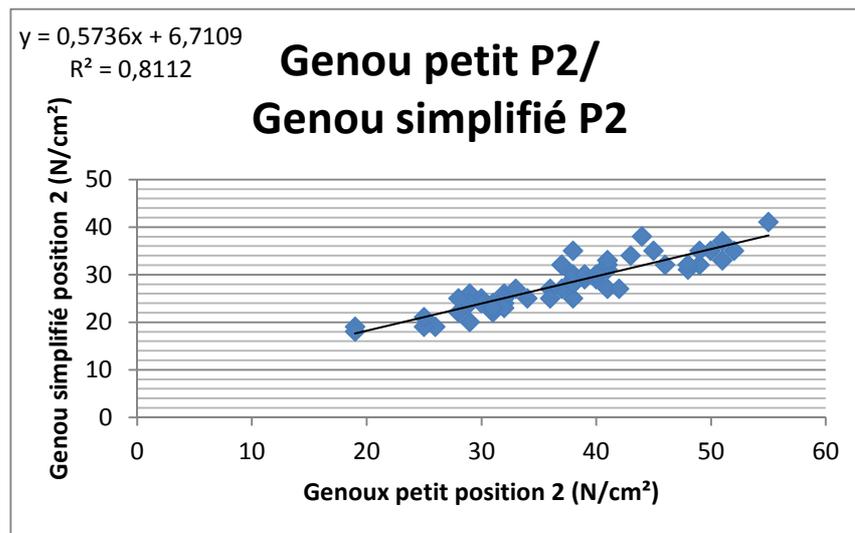


Figure 36 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°2 avec le genou de petite taille et le genou simplifié.

Annexe 6c

Pression à la position du capteur 1

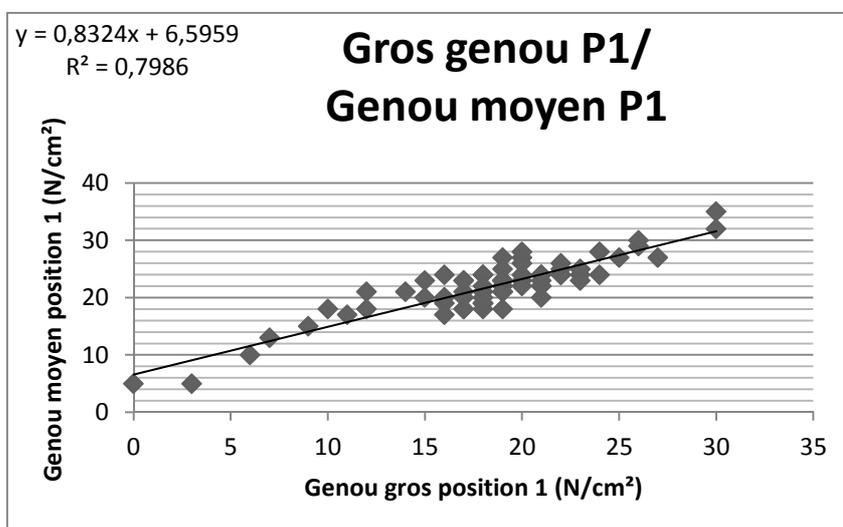


Figure 37 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°1 avec les genoux de grande et moyenne tailles.

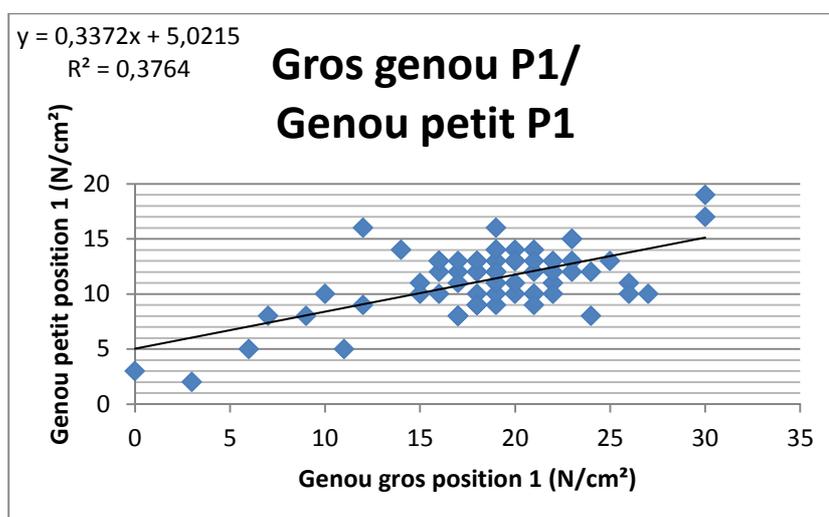


Figure 38 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°1 avec les genoux de grande et petite tailles.

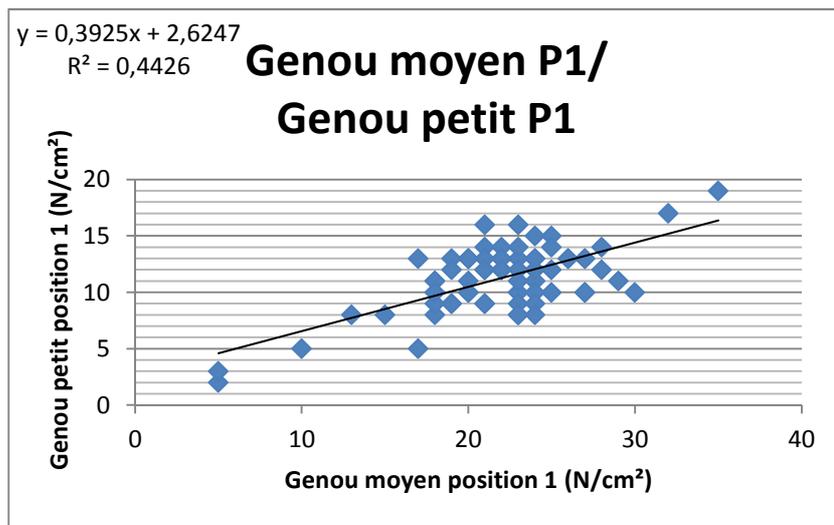


Figure 39 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°1 avec les genoux de moyenne et petite tailles.

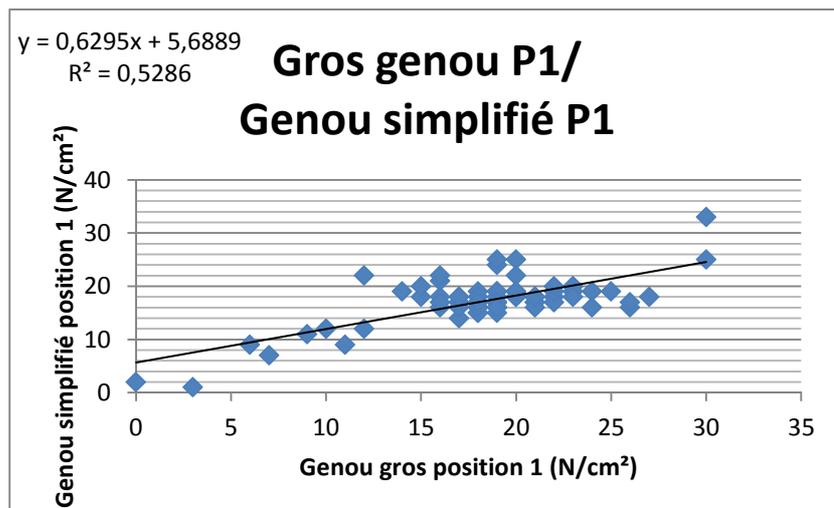


Figure 40 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°1 avec le genou de grande taille et le genou simplifié.

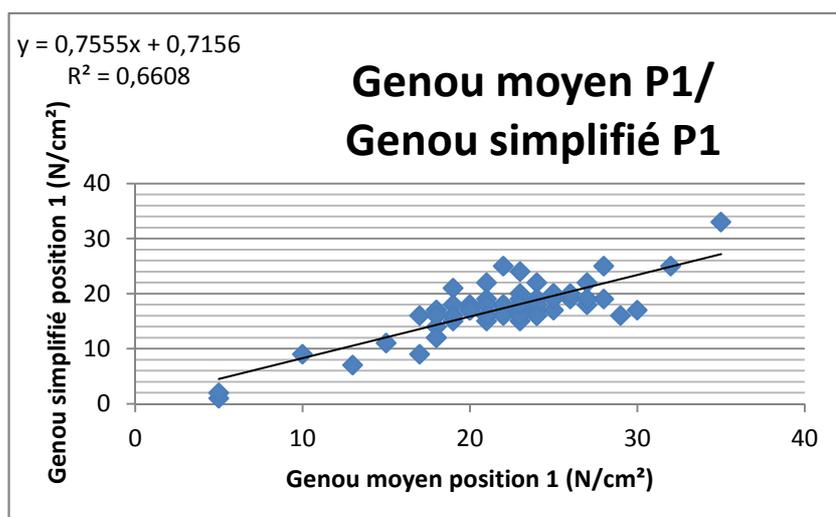


Figure 41 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°1 avec le genou de moyenne taille et le genou simplifié.

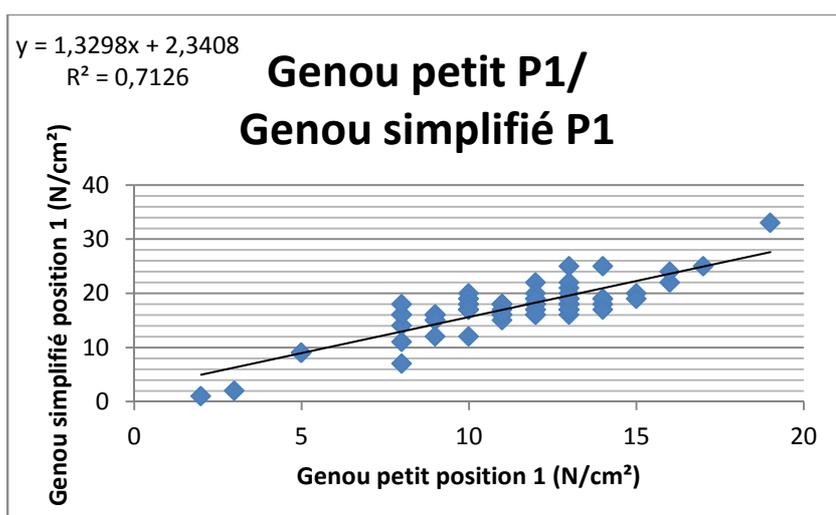


Figure 42 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°1 avec le genou de petite taille et le genou simplifié.

Annexe 6d

Pression à la position du capteur 3

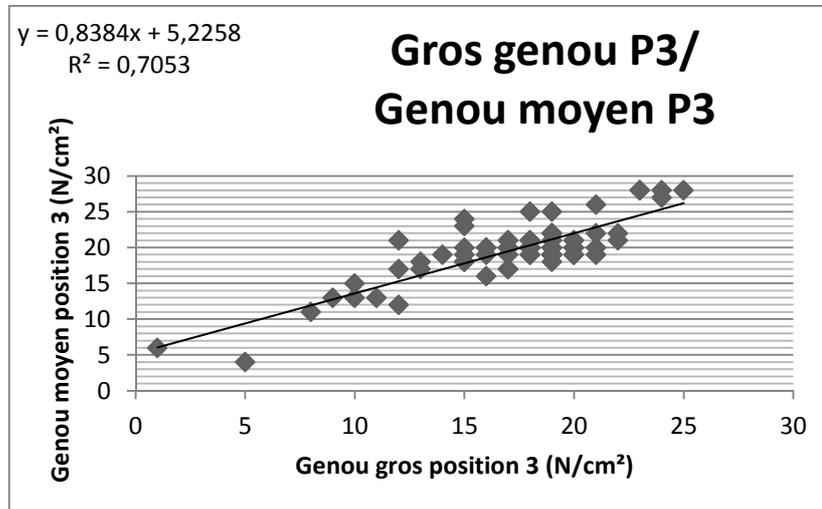


Figure 43 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°3 avec les genoux de grande et moyenne tailles.

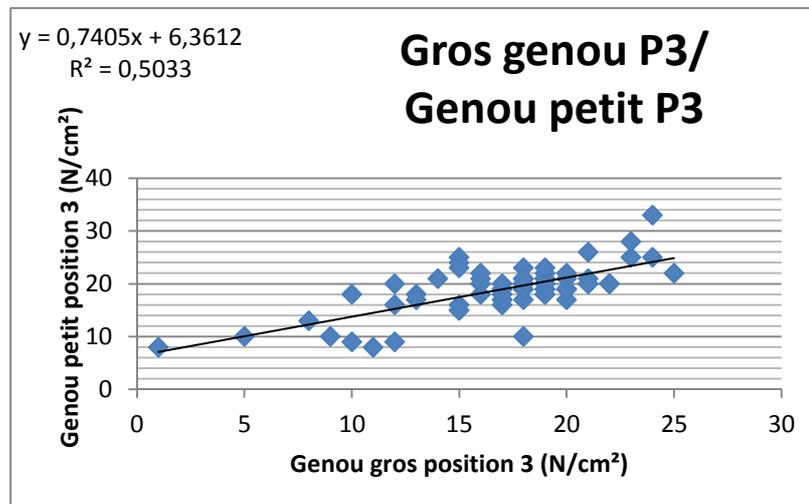


Figure 44 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°3 avec les genoux de grande et petite tailles.

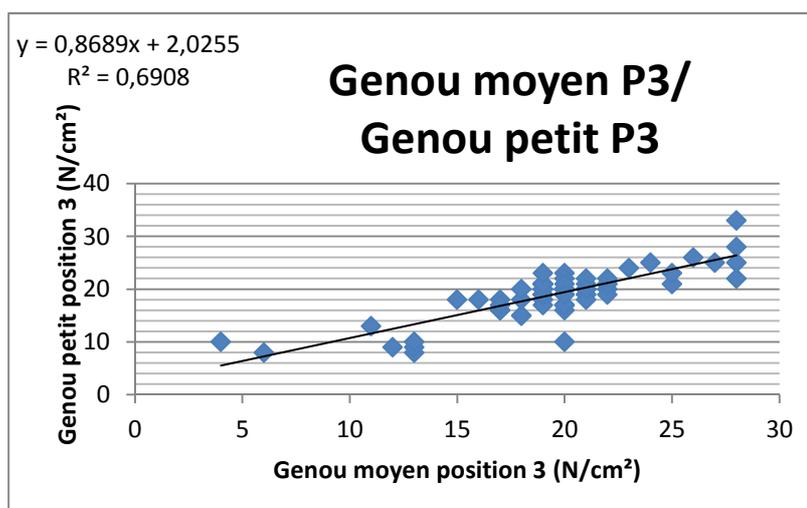


Figure 45 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°3 avec les genoux de moyenne et petite tailles.

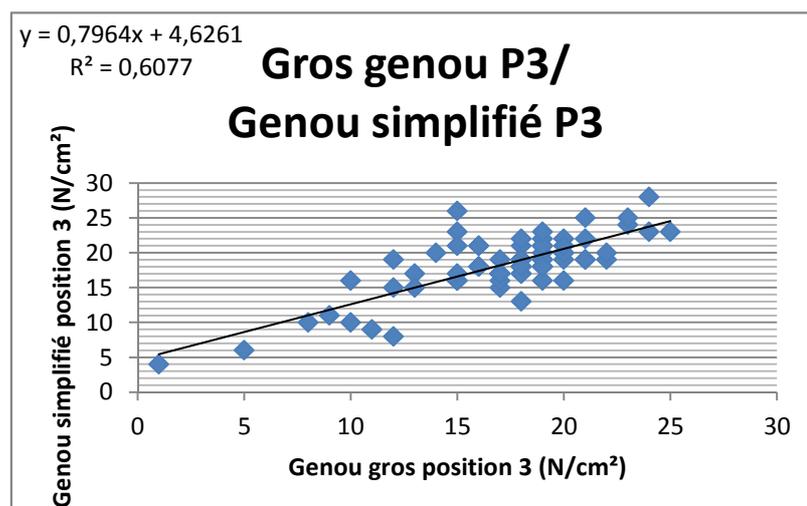


Figure 46 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°3 avec le genou de grande taille et le genou simplifié.

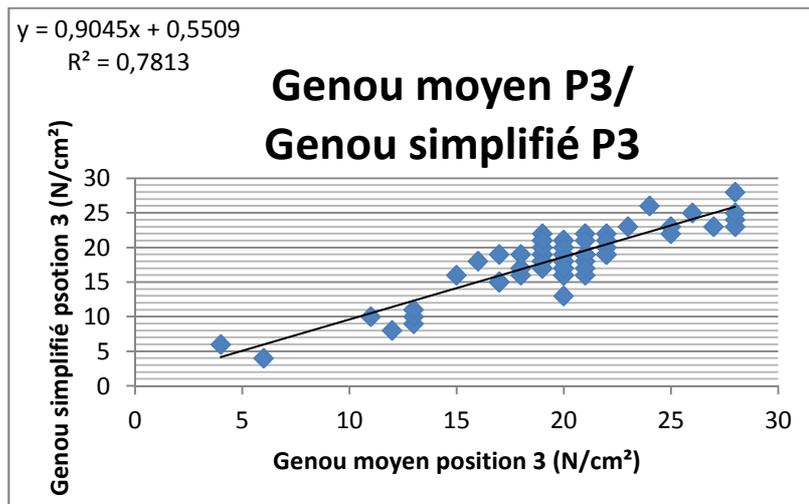


Figure 47 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°3 avec le genou de moyenne taille et le genou simplifié.

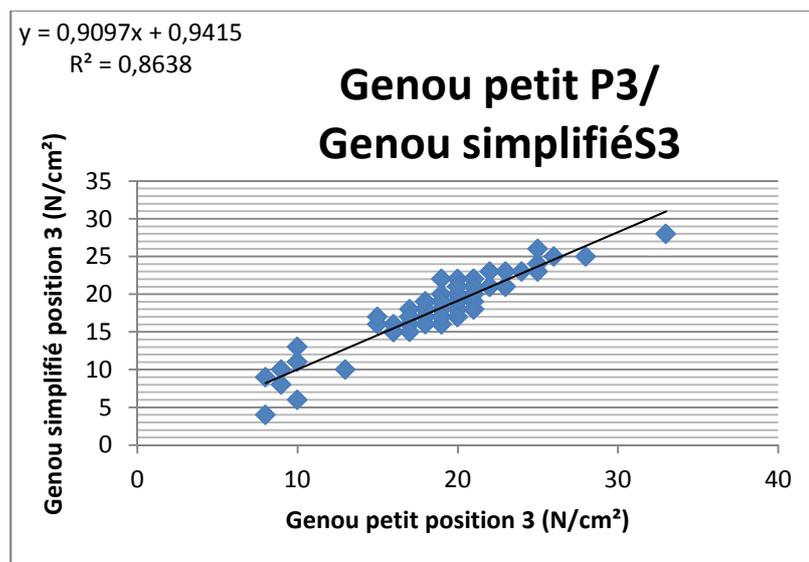


Figure 48 : corrélation entre les pressions obtenues au niveau de la position du capteur n°3 avec le genou de petite taille et le genou simplifié.

Annexe 7

Positions des essais subjectifs

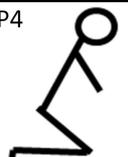
| | sujet | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | Pourcentage moyen d'appui (%) | écart type |
|---|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------------------|------------|
| Poids du sujet | (Kg) | 82 | 82 | 83 | 77 | 97 | 96 | 77 | 80 | 67 | 75 | 64 | 65 | | |
| Position | Genou | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | | |
| P1  | Droit | 30 | 22 | 31 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 25 | 29 | 27 | 18 | 26,10 | 3,48 |
| | Gauche | 33 | 22 | 35 | 16 | 21 | 29 | 21 | 23 | 19 | 29 | 28 | 15 | 24,20 | 6,48 |
| P2  | Droit | 46 | 49 | 46 | 45 | 46 | 46 | 45 | 48 | 42 | 47 | 45 | 46 | 46,00 | 1,64 |
| | Gauche | 46 | 43 | 42 | 44 | 44 | 43 | 45 | 44 | 46 | 45 | 44 | 42 | 44,09 | 1,55 |
| P3  | Droit | 37 | 33 | 31 | 26 | 32 | 32 | 29 | 34 | 30 | 29 | 33 | 34 | 31,57 | 2,81 |
| | Gauche | 30 | 33 | 24 | 26 | 28 | 31 | 18 | 26 | 28 | 13 | 27 | 32 | 26,44 | 5,76 |
| P4  | Droit | 49 | 49 | 46 | 45 | 42 | 48 | 52 | 50 | 51 | 45 | 45 | 51 | 47,80 | 2,93 |
| | Gauche | 49 | 49 | 42 | 45 | 47 | 48 | 40 | 45 | 43 | 56 | 50 | 40 | 46,30 | 4,58 |
| P5  | Droit | 73 | 67 | 70 | 32 | 57 | 57 | 48 | 63 | 55 | 60 | 61 | 54 | 58,05 | 10,73 |
| | Gauche | 67 | 73 | 58 | 39 | 63 | 63 | 52 | 75 | 57 | 64 | 66 | 63 | 61,60 | 9,60 |
| P6  | Droit | 55 | 60 | 54 | 39 | 57 | 46 | 39 | 53 | 57 | 51 | 55 | 63 | 52,29 | 7,51 |
| | Gauche | 45 | 52 | 42 | 45 | 52 | 60 | 39 | 50 | 57 | 55 | 45 | 58 | 50,05 | 6,69 |

Tableau 7 : répartition du poids en fonction de la position à genoux.

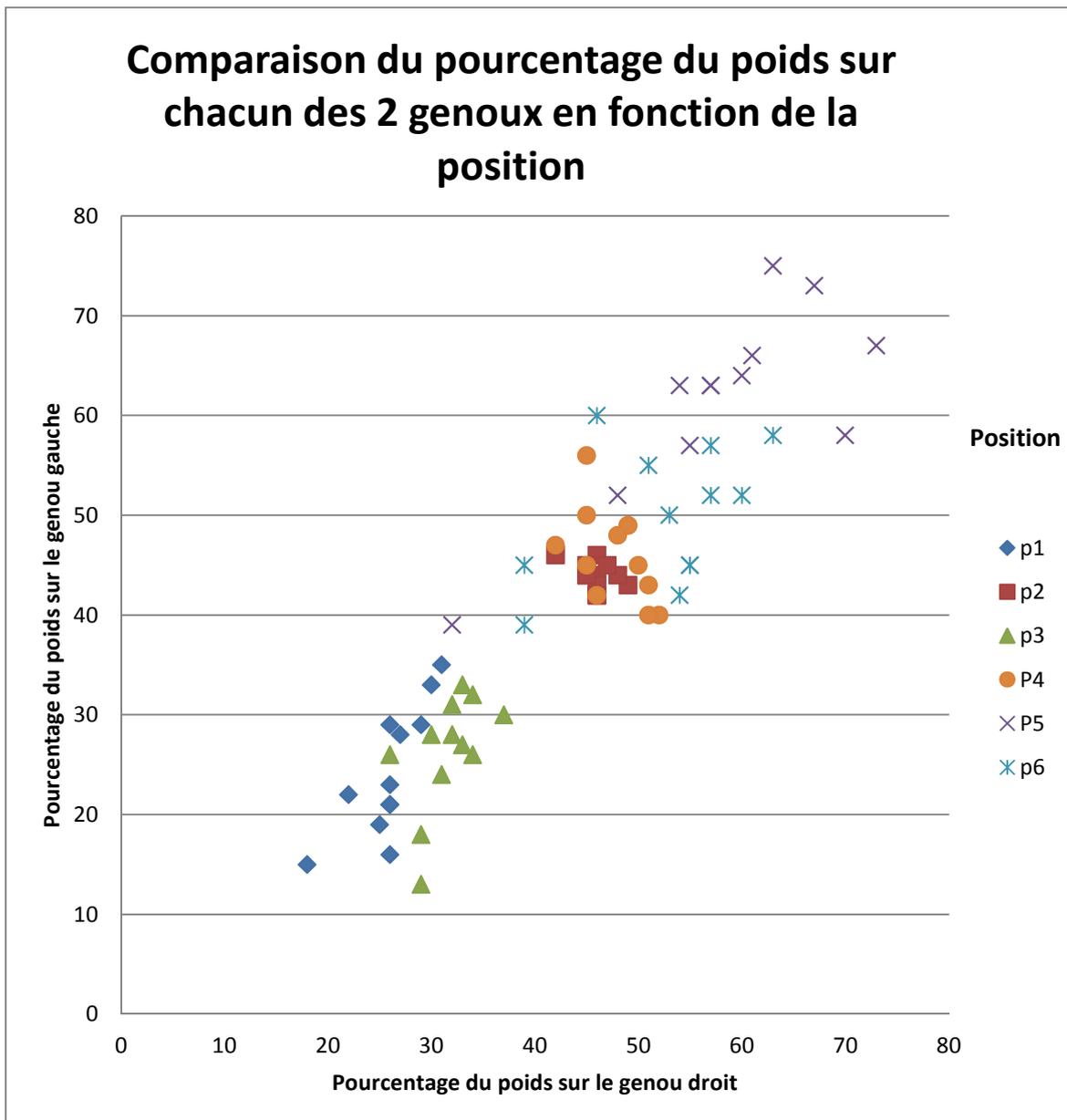


Figure 49 : comparaison du poids sur chacun des 2 genoux en fonction de la position.

Annexe 8

Evaluation du confort par les sujets d'essai

Les tableaux 8 à 17 donnent pour les 10 protecteurs testés par les 10 sujets d'essai, les résultats des mesures de la pression maximale et l'évaluation du confort par les sujets. La valeur de la pression maximale mesurée sur banc d'essai avec la nappe est rappelée en 1ère ligne des tableaux.

| Sujet | Echantillon P1 | | | | | |
|---------|--|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Pression maximale mesurée sur banc : 112 N/cm ² | | | | | |
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 44 | 5 | 40 | 5 | 40 | 5 |
| 2 | 58 | 6 | 58 | 4 | 58 | 4 |
| 3 | 51 | 1,5 | 42 | 2 | 42 | 2 |
| 4 | 58 | 5 | 58 | 4 | 58 | 4 |
| 5 | 43 | 3 | 33 | 3 | 33 | 3 |
| 6 | 32 | 3 | 34 | 2 | 34 | 2 |
| 7 | 58 | 5 | 55 | 5 | 55 | 5 |
| 8 | 28 | 6 | 19 | 6 | 19 | 6 |
| 9 | 35 | 7 | 47 | 3 | 47 | 3 |
| 10 | 30 | 3 | 34 | 2 | 34 | 2 |
| moyenne | 43,7 | 5,25 | 42 | 4,4 | 42,4 | 4,4 |

Tableau 8 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 1.

| Sujet | Echantillon P2 | | | | | |
|---------|---|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Pression maximale mesurée sur banc : 24 N/cm ² | | | | | |
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 35 | 7 | 24 | 7 | 23 | 7 |
| 2 | 18 | 9 | 17 | 8 | 18 | 8 |
| 3 | 19 | 7 | 16 | 7 | 15 | 7 |
| 4 | 31 | 5 | 22 | 5 | 36 | 5 |
| 5 | 15 | 7 | 18 | 6 | 17 | 6 |
| 6 | 19 | 9 | 20 | 9 | 21 | 9 |
| 7 | 12 | 7 | 13 | 7 | 17 | 7 |
| 8 | 13 | 9 | 11 | 9 | 10 | 8 |
| 9 | 18 | 9 | 20 | 9 | 20 | 8 |
| 10 | 17 | 9 | 20 | 7 | 17 | 7 |
| moyenne | 19,7 | 7,8 | 18,1 | 7,3 | 19,4 | 7,1 |

Tableau 9 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 2.

| | Echantillon P3 | | | | | |
|---------|---|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Pression maximale mesurée sur banc : 26 N/cm ² | | | | | |
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 23 | 7 | 26 | 7 | 25 | 7 |
| 2 | 17 | 6 | 16 | 5 | 16 | 5 |
| 3 | 17 | 9 | 16 | 9 | 15 | 9 |
| 4 | 15 | 5 | 22 | 5 | 24 | 5 |
| 5 | 13 | 8 | 12 | 8 | 16 | 6 |
| 6 | 16 | 7 | 16 | 8 | 16 | 8 |
| 7 | 18 | 7 | 17 | 8 | 16 | 8 |
| 8 | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 9 |
| 9 | 18 | 9 | 13 | 9 | 15 | 8 |
| 10 | 22 | 7 | 10 | 7 | 16 | 7 |
| moyenne | 16,7 | 7,4 | 15,6 | 7,5 | 16,7 | 7,2 |

Tableau 10 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 3.

| | Echantillon P4 | | | | | |
|---------|---|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Pression maximale mesurée sur banc : 24 N/cm ² | | | | | |
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| Sujet | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 18 | 9 | 21 | 7 | 21 | 7 |
| 2 | 18 | 9 | 15 | 9 | 9 | 9 |
| 3 | 13 | 9 | 15 | 9 | 23 | 9 |
| 4 | 22 | 9 | 21 | 9 | 25 | 9 |
| 5 | 15 | 8 | 18 | 8 | 11 | 8 |
| 6 | 12 | 9 | 12 | 9 | 15 | 9 |
| 7 | 13 | 9 | 12 | 9 | 16 | 9 |
| 8 | 7 | 9 | 7 | 9 | 5 | 9 |
| 9 | 12 | 9 | 15 | 8 | 11 | 8 |
| 10 | 17 | 9 | 18 | 9 | 16 | 9 |
| moyenne | 14,7 | 8,9 | 15,4 | 8,6 | 15,2 | 8,6 |

Tableau 11 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 4.

| Sujet | Echantillon P5 Pression maximale mesurée sur banc : 84 N/cm ² | | | | | |
|---------|---|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 51 | 4 | 51 | 4 | 58 | 4 |
| 2 | 44 | 8 | 48 | 4 | 42 | 2 |
| 3 | 57 | 2 | 45 | 2 | 42 | 2 |
| 4 | 58 | 3 | 58 | 2 | 58 | 2 |
| 5 | 38 | 3 | 32 | 4 | 28 | 4 |
| 6 | 51 | 2 | 45 | 2 | 58 | 1 |
| 7 | 32 | 7 | 30 | 7 | 33 | 6 |
| 8 | 21 | 9 | 19 | 8 | 22 | 8 |
| 9 | 47 | 9 | 34 | 6 | 34 | 6 |
| 10 | 25 | 7 | 22 | 6 | 33 | 6 |
| moyenne | 42,4 | 5,4 | 38,4 | 4,5 | 40,8 | 4,1 |

Tableau 12 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 5.

| Sujet | Echantillon P6 Pression maximale mesurée sur banc : 12 N/cm ² | | | | | |
|---------|---|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 17 | 9 | 21 | 9 | 21 | 9 |
| 2 | 12 | 9 | 11 | 9 | 37 | 8 |
| 3 | 13 | 7 | 15 | 6 | 11 | 6 |
| 4 | 23 | 6 | 19 | 6 | 20 | 6 |
| 5 | 12 | 9 | 12 | 7 | 16 | 6 |
| 6 | 18 | 9 | 14 | 9 | 20 | 9 |
| 7 | 25 | 6 | 24 | 6 | 18 | 3 |
| 8 | 19 | 6 | 21 | 6 | 17 | 4 |
| 9 | 15 | 8 | 15 | 8 | 15 | 6 |
| 10 | 9 | 8 | 10 | 8 | 18 | 8 |
| moyenne | 16,3 | 7,7 | 16,2 | 7,4 | 19,3 | 6,5 |

Tableau 13 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 6.

| Sujet | Echantillon P7 | | | | | |
|---------|--|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Pression maximale mesurée sur banc : 144 N/cm ² | | | | | |
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 58 | 4 | 58 | 3 | 58 | 3 |
| 2 | 44 | 6 | 58 | 3 | 58 | 3 |
| 3 | 58 | 4 | 58 | 2 | 58 | 2 |
| 4 | 58 | 4 | 58 | 4 | 58 | 4 |
| 5 | 58 | 3 | 54 | 1 | 54 | 1 |
| 6 | 58 | 0 | 55 | 1 | 55 | 1 |
| 7 | 58 | 4 | 56 | 2 | 56 | 2 |
| 8 | 35 | 4 | 30 | 5 | 30 | 5 |
| 9 | 56 | 3 | 58 | 2 | 58 | 2 |
| 10 | 40 | 3 | 38 | 4 | 39 | 4 |
| moyenne | 52,3 | 3,5 | 52,3 | 2,7 | 52,4 | 2,7 |

Tableau 14 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 7.

| Sujet | Echantillon P8 | | | | | |
|---------|---|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Pression maximale mesurée sur banc : 32 N/cm ² | | | | | |
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 21 | 7 | 21 | 7 | 21 | 6 |
| 2 | 20 | 8 | 16 | 7 | 8 | 7 |
| 3 | 12 | 7 | 12 | 6 | 13 | 6 |
| 4 | 21 | 6 | 23 | 6 | 22 | 6 |
| 5 | 9 | 6 | 13 | 6 | 14 | 7 |
| 6 | 18 | 5 | 18 | 6 | 20 | 6 |
| 7 | 16 | 8 | 16 | 8 | 16 | 8 |
| 8 | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 |
| 9 | 15 | 9 | 15 | 7 | 14 | 7 |
| 10 | 12 | 9 | 11 | 8 | 16 | 8 |
| moyenne | 15,2 | 7,4 | 15,3 | 7 | 15,3 | 6,9 |

Tableau 15 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 8.

| Sujet | Echantillon P9 Pression maximale mesurée sur banc : 33 N/cm ² | | | | | |
|---------|---|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 50 | 8 | 31 | 7 | 29 | 7 |
| 2 | 21 | 9 | 29 | 8 | 21 | 7 |
| 3 | 20 | 7 | 17 | 7 | 22 | 7 |
| 4 | 31 | 6 | 32 | 6 | 33 | 6 |
| 5 | 25 | 6 | 29 | 7 | 27 | 3 |
| 6 | 19 | 4 | 21 | 5 | 25 | 5 |
| 7 | 16 | 7 | 23 | 6 | 23 | 6 |
| 8 | 8 | 9 | 10 | 8 | 14 | 6 |
| 9 | 20 | 7 | 21 | 7 | 23 | 4 |
| 10 | 18 | 7 | 16 | 7 | 23 | 7 |
| moyenne | 22,8 | 7 | 22,9 | 6,8 | 24 | 5,8 |

Tableau 16 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 9.

| Sujet | Echantillon P10 Pression maximale mesurée sur banc : 58 N/cm ² | | | | | |
|---------|--|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|
| | Temps T1 | | Temps T3 | | Temps T6 | |
| | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort | Pression max (N/cm ²) | Confort |
| 1 | 21 | 7 | 27 | 7 | 37 | 7 |
| 2 | 15 | 9 | 20 | 8 | 20 | 8 |
| 3 | 12 | 7 | 11 | 8 | 18 | 8 |
| 4 | 20 | 6 | 29 | 6 | 28 | 5 |
| 5 | 14 | 8 | 12 | 9 | 10 | 8 |
| 6 | 22 | 6 | 21 | 6 | 17 | 6 |
| 7 | 20 | 9 | 20 | 7 | 25 | 5 |
| 8 | 17 | 6 | 17 | 6 | 7 | 6 |
| 9 | 10 | 9 | 10 | 7 | 9 | 5 |
| 10 | 18 | 7 | 17 | 6 | 25 | 6 |
| moyenne | 16,9 | 7,4 | 18,4 | 7 | 19,6 | 6,4 |

Tableau 17 : pression maximale et note du confort - Genouillère n° 10.

Annexe 9

Photos des capteurs de force et de pression



Figure 49 : nappe de capteurs de pression.

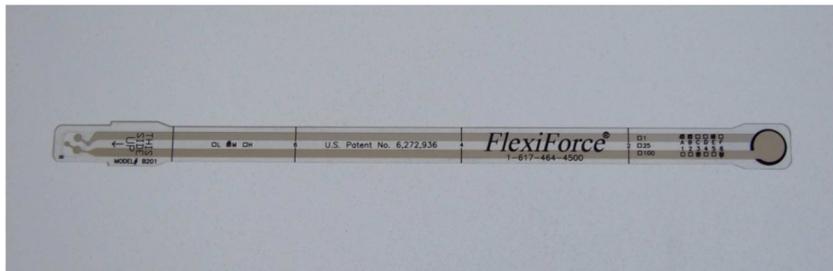


Figure 50 : exemple de capteur de force.

La surface de mesure est un disque de 9,5 mm.