



**Évaluation de la méthode d'essai
des semelles anti-perforation en textile
selon la norme NF EN ISO 20344 : 2012**

Évaluation de la méthode d'essai des semelles anti-perforation en textile selon la norme NF EN ISO 20344 : 2012

Ghislaine GRAND

NS 309
octobre 2013

Evaluation de la méthode d'essai des semelles anti-perforation en textile selon la norme NF EN ISO 20344 : 2012

Résumé

Suite à des accidents sur chantier où des salariés ont eu le pied perforé par des pointes malgré le port de chaussures anti-perforation, une étude a été réalisée. Son objectif était d'évaluer l'essai de résistance à la perforation de la norme NF EN ISO 20344 : 2012 et de mettre au point une nouvelle méthode d'essai adaptée aux inserts en textile et représentative des conditions réelles d'utilisation. Pour ce faire, il a été nécessaire d'évaluer la pertinence des paramètres suivants :

- valeur limite de la force de perforation pour protéger les salariés,
- géométrie de la pointe : forme, diamètre, angle, troncature,
- vitesse de pénétration,
- diamètre du trou du porte-échantillon.

L'INRS préconise une nouvelle valeur limite de 1300N pour la force de perforation et la modification de la pointe. Son choix se porte sur une pointe de forme pyramidale, de diamètre de 3 mm, de troncature de 1 mm et d'angle de 30°.

Cinq inserts prélevés sur le marché ont été testés, ils ne satisfont pas ces nouvelles préconisations.

Pour les essais des semelles en acier, la pointe normalisée selon la norme NF EN ISO 20344 : 2012 est bien dimensionnée et n'est pas remise en cause.

Evaluation de la méthode d'essai des
semelles anti-perforation en textile
selon la norme NF EN ISO 20344 : 2012

Sommaire

1.	Introduction	9
2.	Recherche bibliographique.....	10
2.1.	Force d'appui.....	10
2.2.	Vitesse de rabattement du pied	12
3.	Méthodologie.....	13
3.1.	Banc et protocole d'essai.....	13
3.2.	Protocole de l'étude.....	14
4.	Résultats	17
4.1.	Répétabilité et reproductibilité des essais.....	18
4.2.	Géométrie des pointes	19
4.3.	Vitesse de pénétration.....	23
4.4.	Diamètre du trou du porte-échantillon.....	24
4.5.	Qualités d'insert.....	25
5.	Conclusion	28
6.	Bibliographie	29

1. Introduction

Suite à la sollicitation de la Caisse Régionale d'Assurance Maladie d'Ile de France (CRAMIF), l'INRS a pris connaissance de deux accidents du travail survenus sur des chantiers : deux salariés ont eu le pied perforé par un clou alors qu'ils portaient des chaussures de sécurité comportant des semelles anti-perforation, également appelées « inserts », en matériau composite. Pour le premier accident, le clou avait un diamètre de 3,1 mm et une longueur de 71 mm, le salarié pesait 96 kg. Nous n'avons pas d'information sur le second accident.

Les performances et les propriétés requises pour les chaussures d'usage général destinées à assurer la protection des pieds sont données dans une série de trois normes :

- NF EN ISO 20345 : 2012 [1] (EN ISO 20345 : 2011) pour les chaussures dites de sécurité,
- NF EN ISO 20346 : 2004 [2] (EN ISO 20346 : 2004) pour les chaussures dites de protection,
- NF EN ISO 20347 : 2012 [3] (EN ISO 20347 : 2012) pour les chaussures dites de travail.

La différence entre ces trois types de chaussures porte sur le niveau de protection assuré par l'embout de protection (cf. figure 1) :

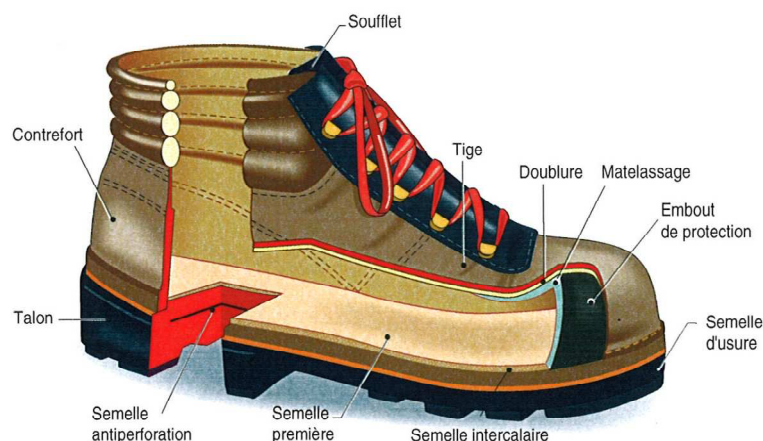


Figure 1. Les différents éléments d'une chaussure de sécurité.

Les méthodes d'essais sont décrites dans la norme NF EN ISO 20344 : 2012¹ [4] (EN ISO 20344 : 2011).

La norme NF EN 12568 : 2010¹ [5] (EN 12568 : 2010) traite spécifiquement des exigences et méthodes d'essais des embouts de chaussure et des inserts anti-perforation. Elle a été

¹ Les normes NF EN ISO 20344 : 2012 et NF EN 12568 : 2010 ont remplacé respectivement les normes NF EN ISO 20344 : 2004 et NF EN 12568 : 1998. En ce qui concerne la résistance à la perforation, les modifications ont porté sur les distances entre les points de perforation et sur la réalisation de l'essai pour les inserts en textile. Celui-ci consistait à enfoncer une pointe, à une vitesse de 10 mm.min⁻¹, sur la semelle jusqu'à la perforation complète. La valeur de la force appliquée était alors relevée. Dans les normes NF EN ISO 20344 : 2012 et NF EN 12568 : 2010, elle consiste à appliquer une force de 1100N à une vitesse de 10 mm.min⁻¹ et d'arrêter la machine pour procéder à un examen visuel et constater ou non la perforation de la semelle. La pointe normalisée et la valeur limite de résistance à la perforation sont restées identiques. L'étude décrite dans ce document est donc valable aussi bien pour les normes NF EN ISO 20344 : 2012 et NF EN 12568 : 2010 que pour les normes NF EN ISO 20344 : 2004 et NF EN 12568 : 1998.

élaborée dans le but de permettre aux fabricants de démontrer le niveau de performances de ces composants avant qu'ils ne soient insérés dans la chaussure.

Concernant les inserts anti-perforation en textile, ces normes spécifient que « *lorsque les chaussures sont soumises à l'essai conformément à l'ISO 20344 (annexe A), en appliquant une force d'au moins 1100N, la pointe du clou ne doit pas perforer l'éprouvette. Pour obtenir un résultat d'essai « satisfaisant », la pointe du clou ne doit pas dépasser de l'éprouvette faisant l'objet d'une vérification par détection visuelle, cinématographique ou électrique. Si la surface opposée de l'éprouvette a été perforée, l'éprouvette a échoué à l'essai. S'il se produit une séparation entre les couches de l'éprouvette (« effet de tente »), l'éprouvette a échoué à l'essai* ».

L'INRS avait réalisé, en 2010, une première étude qui est décrite dans le rapport d'intervention N°IET/10RI-199/MJs. Elle avait pour objectif de vérifier la conformité aux normes applicables de la chaussure incriminée dans l'accident de travail, d'analyser le comportement à la perforation de quelques chaussures prélevées sur le marché et d'évaluer la pertinence de la méthode d'essai normalisée de l'époque. Elle a montré que :

- la chaussure incriminée dans l'accident avait une résistance à la perforation inférieure au minimum requis,
- les chaussures prélevées sur le marché répondaient aux spécifications de la norme,
- la méthode d'essai normalisée, développée pour tester des inserts en acier, n'était pas adaptée pour tester des inserts en textile.

Une nouvelle étude a été entreprise afin :

- d'évaluer les paramètres de l'essai normalisé influençant la force de perforation et la déformation de l'insert,
- de proposer une méthode d'essai adaptée aux inserts en textile et représentative des conditions réelles d'utilisation.

Ce document présente la synthèse des résultats et les conclusions de cette étude.

2. Recherche bibliographique

Une recherche bibliographique a été réalisée sur les paramètres mécaniques mis en œuvre lors de la marche afin de vérifier la pertinence de la valeur limite de la force de perforation et de la vitesse de pénétration exigées par la norme. Nous nous sommes intéressés plus précisément à la force d'appui et à la vitesse de rabattement du pied dans le cadre de la marche normale de l'homme.

2.1. Force d'appui

Le cycle de la marche est détaillé dans la littérature :

« *Par convention, le cycle de la marche débute lorsque le talon d'un pied se pose et se termine quand ce même talon se pose à nouveau de manière consécutive sur le sol ; il comprend deux phases essentielles qui sont la phase d'appui et la phase oscillante, il dure environ 1 seconde* » [6] (cf. figure 2).

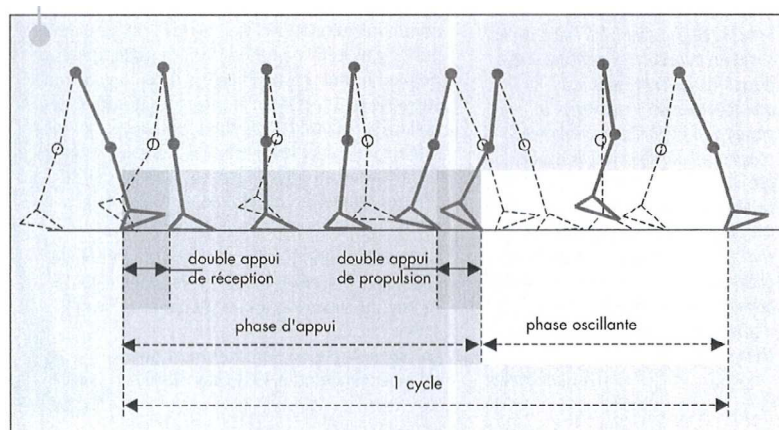


Figure 2. Représentation schématique du cycle de la marche et de ses principales phases et sous-phases [6].

La phase d'appui dure 60 % du cycle et peut se décomposer en trois sous-phases. La première sous-phase appelée double appui de réception dure 10 % du cycle. « Les deux pieds sont en contact avec le sol, le pied qui atterrit se pose entièrement pendant que le pied contro-latéral quitte progressivement le sol. C'est pendant cette période que s'effectue le transfert de poids du corps, augmenté de l'effet dynamique, du pied d'appui contro-latéral vers le pied récepteur » [6]. Les deux autres sous-phases sont : la phase unilatérale où un seul pied est en appui sur le sol et se décolle en fin de phase et la phase double appui de propulsion où « les deux pieds sont à nouveau simultanément en contact avec le sol et le pied porteur pousse en arrière et latéralement pour faire progresser le corps vers l'avant et vers le pied contro-latéral qui devient receveur » [6].

Dans l'article [7], E.M. LAASSEL & al. se sont intéressés aux forces de réaction du pied au cours de la marche normale. Ils montrent que la force maximale du pied sur le sol présente deux pics dont l'intensité varie entre 80 et 140 % du poids de la personne (fenêtre 3 de la figure 3).

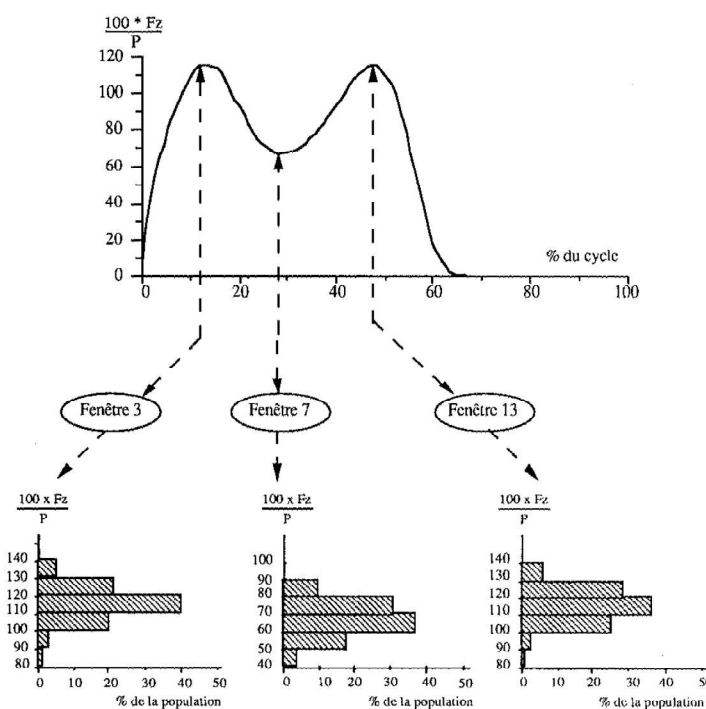


Figure 3. Courbes du rapport Fz/P (réaction verticale/poids) en fonction du cycle de la marche et distributions pour les fenêtres 3, 7 et 13 [7].

Sur la base de ces résultats, en considérant le cas le plus défavorable (marche avec un pic maximal de 140 %), la valeur limite normalisée de résistance à la perforation de 1100N correspond à une force appliquée par une personne de 80 kg.

Ce poids de 80 kg est légèrement supérieur à la valeur moyenne des hommes (77,4 kg) évaluée lors de la campagne de mensuration de l'IFTH¹ de 2006 [8] et ne permet pas de tenir compte de la surcharge provenant du port de matériels (sacs de ciment de 25 à 35 kg, caisses à outils,...) par les salariés lors de la réalisation de leur travail. Ainsi, la valeur normalisée de résistance à la perforation de 1100N permet de protéger seulement une partie des personnes présentes sur chantier.

Le tableau 1 indique la force d'appui appliquée, dans le cas où le pic maximal de la marche atteint 115 % (valeur moyenne) et 140 % (valeur maximale), en fonction d'un poids total du salarié variant entre 80 et 120 kg. Le poids total du salarié s'entend avec port de charge.

Poids total du salarié (kg)	Force d'appui (pic maximal à 115 %) (N)	Force d'appui (pic maximal à 140 %) (N)
80	905	1100
90	1015	1240
100	1130	1375
110	1240	1510
120	1355	1650

Tableau 1. Forces d'appui en fonction du poids total du salarié et du pic maximal lors de la marche

On peut donc constater qu'une personne de 75 kg portant un sac de ciment de 35 kg nécessiterait un insert résistant à une force minimale respectivement de 1240N et 1510N dans le cas où le pic maximal atteint 115 % et 140 %.

La force maximale appliquée au moment du contact du pied avec le sol dépend non seulement du poids mais aussi de la vitesse de la personne. L'étude actuelle se limite à des personnes marchant sur les chantiers. Pour information, De Wit B. et al. [9] ont analysé le rapport force d'appui/poids en fonction de la vitesse du sujet. Pour une course à 3,5 m.s⁻¹ (soit 13 km.h⁻¹), ce rapport est de l'ordre de 1,8. Il peut atteindre la valeur de 2,8 lors d'une course à 5,5 m.s⁻¹ (soit 16 km.h⁻¹). D'après cet article, on peut donc estimer que pour une personne de 80 kg, la force maximale d'appui peut varier de 1400 à 2200N lors d'une course pour des vitesses comprises entre 3,5 et 5,5 m.s⁻¹. Le cas de la course ne sera pas pris en compte dans cette étude mais permet de souligner l'influence de la vitesse de la personne sur la force d'appui.

Il semblerait pertinent d'augmenter sensiblement la valeur limite de la norme à 1300N, correspondant à une personne de 95 kg ayant une marche avec un pic maximal de 140 %.

2.2. Vitesse de rabattement du pied

La recherche bibliographique n'a pas permis de trouver d'article évaluant la vitesse de rabattement du pied. Cependant, elle peut se calculer à partir de données connues sur la marche et la morphologie de l'homme. Il s'agit de déterminer, dans un premier temps, la distance parcourue par la pointe du pied et le temps que met le pied pour se rabattre sur le sol. Le rapport de ces deux valeurs permettra d'en déduire la vitesse de rabattement du pied.

¹ IFTH : Institut Français du Textile et de l'Habillement.

La campagne de mensuration IFTH de 2006 a indiqué que le pied d'un homme mesure entre 20,6 cm et 32,3 cm. Par ailleurs, l'angle que fait la cheville avec le sol au moment de la pose du talon est de 20° [10]. La distance parcourue par la pointe du pied varie ainsi entre 7 et 11 cm.

La vitesse de pas d'un homme est comprise entre 75 et 140 pas/min [11] et la phase d'appui correspondant à 10 % du temps de marche. Le temps pour rabattre son pied est alors compris entre 0,04 et 0,08 s.

On peut donc estimer que la vitesse de rabattement du pied varie entre 0,88 et 2,56 m.s⁻¹ soit de 5 à 15 10⁴ mm.min⁻¹. Cette vitesse est donc très éloignée de la vitesse de pénétration de 10 mm.min⁻¹ choisie dans la norme. Il sera envisagé de réaliser des tests avec une vitesse de pénétration plus élevée.

3. Méthodologie

3.1. Banc et protocole d'essai

Les essais de perforation ont été effectués à l'aide d'une machine de traction permettant de mesurer la force de perforation et la déformation de l'insert.

Un insert est placé entre deux plaques appelées « porte-échantillon » (cf. figure 4). Celles-ci présentent un trou de diamètre déterminé qui permet le passage de la pointe. La vitesse de pénétration est définie, la force de pénétration et la déformation sont enregistrées au cours de l'expérience. L'opérateur arrête l'essai au moment où il détecte visuellement la perforation de l'insert, à savoir au moment où la pointe vient juste de percer le textile (cf. figure 5).

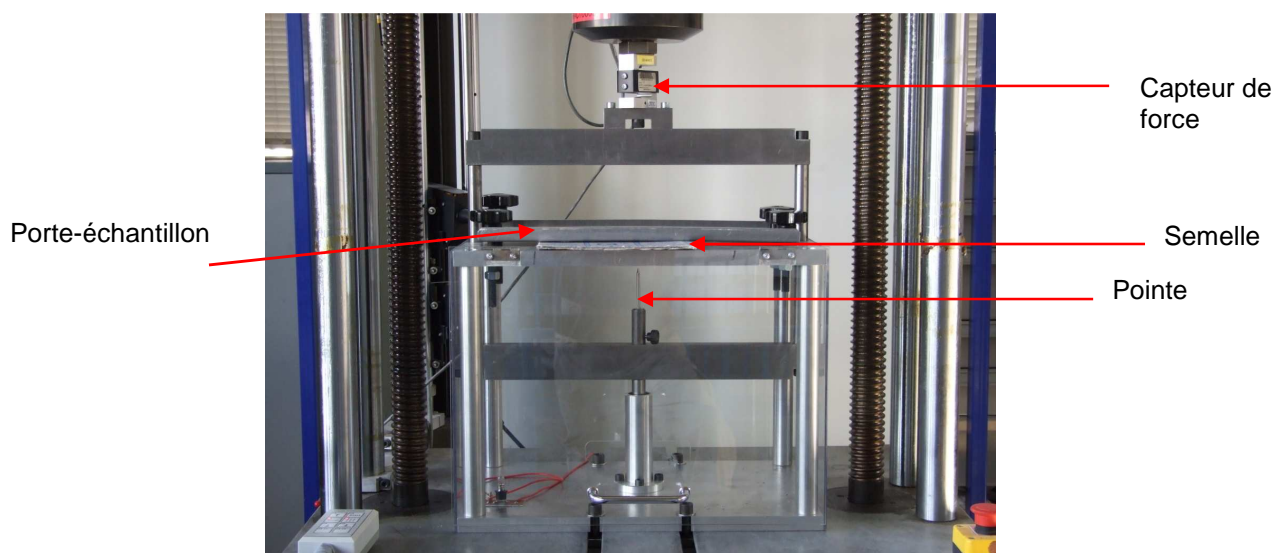
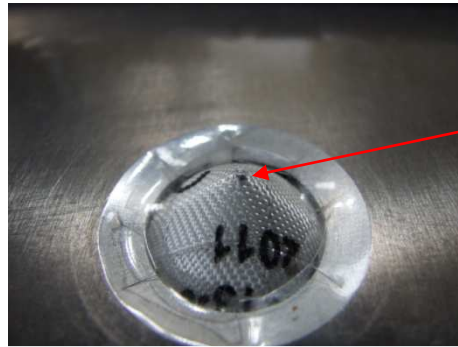


Figure 4. Banc d'essai.



Pointe qui vient juste de percer

Figure 5. Exemple de perforation d'un insert.

La courbe de déplacement de la pointe en fonction de la force appliquée sur l'insert est enregistrée (cf. figure 6). La force de perforation correspond à la force maximale de pénétration, relevée au moment de la perforation. La déformation est calculée à partir de la différence entre la valeur de déplacement au moment du contact de la pointe avec le textile et celle au moment de l'arrêt de l'essai.

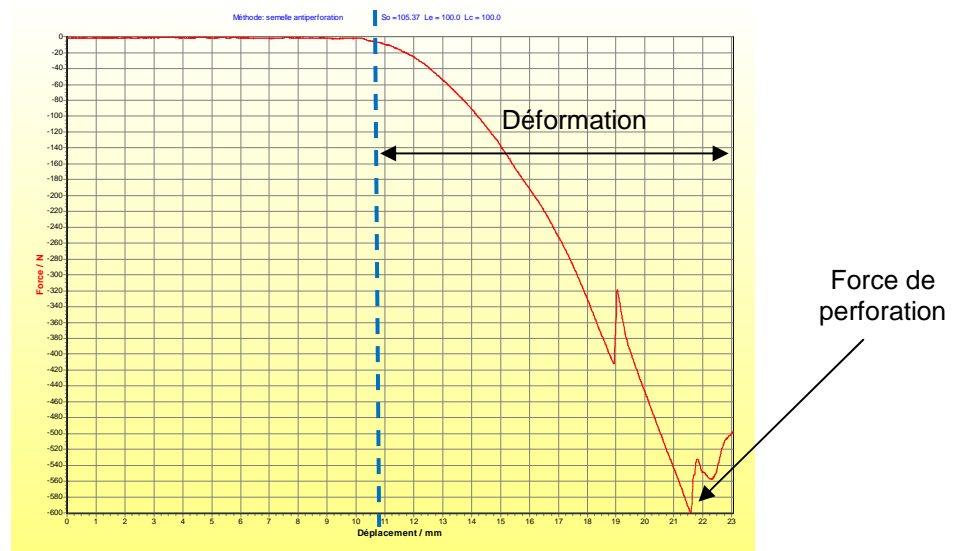


Figure 6. Exemple de courbe de déplacement de la pointe en fonction de la force appliquée sur la semelle en textile.

3.2. Protocole de l'étude

Les différents paramètres d'essai ont été étudiés afin d'évaluer leurs influences sur la mesure de la force de perforation et sur la déformation de la semelle. Les essais ont été réalisés sur un type d'insert textile de qualité moyenne.

Sur la base de l'analyse bibliographique et des résultats des essais, ces paramètres ont été figés, en prenant les valeurs jugées les plus pertinentes. Des essais de validation ont alors été effectués sur différents types d'insert textile de qualités différentes.

Dix mesures ont été réalisées pour chacune des conditions d'essai considérées.

Reproductibilité et répétabilité

Pour évaluer la répétabilité et la reproductibilité des essais, dix mesures ont été effectuées sur un même insert, d'abord avec une même pointe conforme à la norme, puis avec une seconde identique à la première.

Les conditions d'essai ont été celles spécifiées par la norme : vitesse de pénétration à $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ et diamètre du trou du porte-échantillon à 25 mm.

La force de perforation et la déformation au moment de la perforation ont été analysées afin de déterminer les précisions des mesures ainsi réalisées.

Géométrie des pointes

La pointe normalisée est de forme cylindrique de diamètre 4,5 mm, l'extrémité est conique avec une troncature de 1 mm et un angle de 30° .

Suite à des visites de chantier, il s'est avéré que la pointe normalisée n'était pas représentative de celles trouvées in situ. Celles-ci présentent essentiellement les caractéristiques suivantes : leur diamètre varie de 2,4 à 5 mm avec majoritairement un diamètre de 3 mm, leur longueur varie entre 50 et 110 mm, leur extrémité est principalement de forme pyramidale, de troncature de plus de 1 mm et avec souvent des angles supérieurs à 30° . Quelques vis et quelques autres pointes avec une extrémité de forme conique ont également été trouvées.

Les pointes se caractérisent par les paramètres suivants : diamètre de la pointe, forme, troncature et angle de l'extrémité (cf. figure 7).

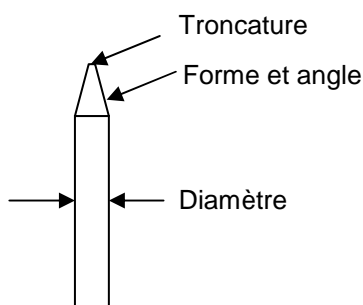


Figure 7. Caractéristiques d'une pointe.

Différentes pointes d'essai ont été choisies pour couvrir les caractéristiques suivantes :

- la forme de l'extrémité : pyramidale (P) et conique (C),
- le diamètre de la pointe : 2,5, 3 et 4,5 mm (D2,5, D3 et D4,5),
- la troncature : 0, 1 et 2 mm (T0, T1 et T2),
- l'angle de l'extrémité : 15° , 30° et 45° (A15, A30 et A45).

Les pointes utilisées dans l'étude sont listées dans le tableau 2. Elles ont été spécialement fabriquées en atelier pour s'assurer de l'exactitude et de la reproductibilité des paramètres. Le matériau est de l'acier de dureté HRC ≥ 60 comme le spécifie la norme.

Les pointes sont identifiées de la manière suivante dans la suite du document : forme de la pointe – diamètre – troncature – angle de la pointe. La pointe normalisée, conique, de diamètre 4,5 mm, de troncature 1 mm et d'angle 30° est donc appelée C-D4,5-T1-A30.

Pointe	Forme de l'extrémité	Diamètre (mm)	Troncature (mm)	Angle (°)
C-D4,5-T0-A30	C	4,5	0	30
C-D4,5-T1-A30	C	4,5	1	30
C-D4,5-T2-A30	C	4,5	2	30
P-D4,5-T0-A30	P	4,5	0	30
P-D4,5-T1-A30	P	4,5	1	30
P-D4,5-T2-A30	P	4,5	2	30
C-D4,5-T0-A15	C	4,5	0	15
C-D4,5-T1-A15	C	4,5	1	15
C-D4,5-T0-A45	C	4,5	0	45
C-D4,5-T0-A45	C	4,5	1	45
P-D2,5-T1-A30	P	2,5	1	30
P-D3-T1-A30	P	3	1	30

Tableau 2. Caractéristiques des pointes utilisées pour l'étude.

Quelques pointes sont représentées sur la figure 8.

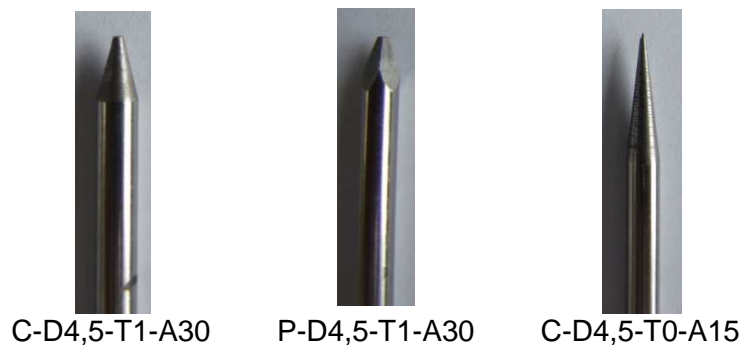


Figure 8. Exemples de pointes avec différentes géométries.

Pour évaluer l'influence de la géométrie de la pointe, les essais ont été réalisés avec une vitesse de pénétration de $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ et un diamètre du trou du porte-échantillon de 25 mm.

Vitesse de pénétration

Deux valeurs de vitesse de pénétration ont été considérées : $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (valeur normalisée) et $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Cette dernière correspond à la vitesse la plus élevée à partir de laquelle l'instant précis de la perforation devient difficilement détectable.

Diamètre du trou du porte-échantillon

Afin de déterminer l'influence du support de l'insert, des essais ont été réalisés avec trois diamètres différents du trou du porte-échantillon : 12,5, 25 et 50 mm.

Différentes qualités d'inserts

Sur la base des investigations effectuées précédemment, les nouveaux paramètres d'essai ont été figés.

Des essais ont alors été effectués sur 5 types d'insert textile de qualités et origines différentes, avec deux nouvelles pointes sélectionnées parmi celles testées afin de valider leur pertinence. Ces essais ont aussi permis d'évaluer le comportement des inserts avec ces pointes.

Ils ont été réalisés en outre avec la pointe conique normalisée, afin de permettre la comparaison des forces de perforation obtenues avec les conditions d'essai actuelles et nouvelles.

4. Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de graphes en boîte à moustaches de Tukey qui permet de repérer les données suivantes (cf. figure 9) :

- l'échelle des valeurs de la variable, située sur l'axe vertical.
- la valeur du 1er quartile Q1 (25 % des effectifs), correspondant au trait inférieur de la boîte,
- la valeur de la médiane (50 % des effectifs), représentée par un trait horizontal à l'intérieur de la boîte,
- la valeur moyenne, indiquée par une croix,
- la valeur du 3ème quartile Q3 (75 % des effectifs), correspondant au trait supérieur de la boîte,
- les 2 « moustaches » inférieure et supérieure qui délimitent les valeurs dites adjacentes. Elles sont déterminées à partir de l'écart interquartile (Q3-Q1).
- les valeurs dites extrêmes, atypiques, exceptionnelles, situées au-delà des valeurs adjacentes sont individualisées. Elles sont représentées par un carré.

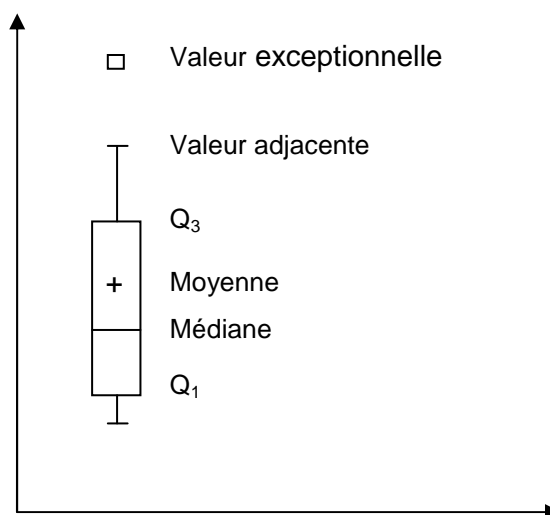


Figure 9. Boîte à moustaches de Tukey.

Les résultats sont complétés par un tableau indiquant la valeur moyenne, l'écart-type et les valeurs extrêmes (minimum et maximum) pour la variable considérée.

4.1. Répétabilité et reproductibilité des essais

Force de perforation

La figure 10 présente les résultats de la force de perforation obtenue avec deux échantillons de la pointe normalisée et le tableau 3 regroupe les valeurs moyennes, extrêmes et les écart-types de cette variable.

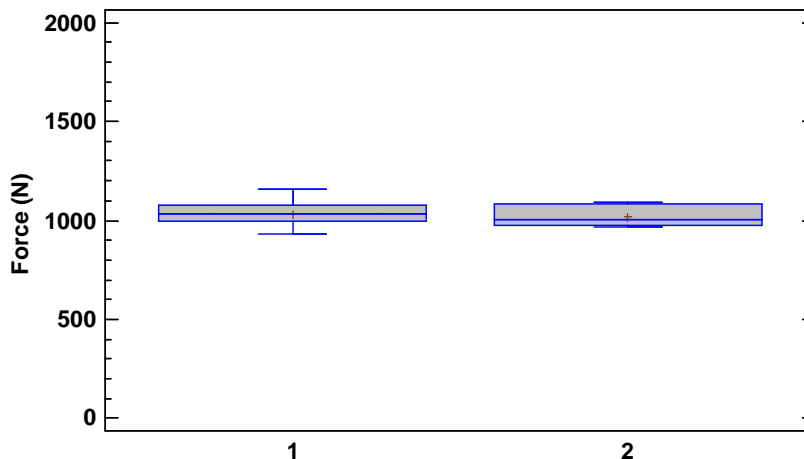


Figure 10. Forces de perforation pour deux pointes normalisées C-D4,5-T1-A30.

Pointe	Force moyenne (N)	Ecart-type	Force minimale (N)	Force maximale (N)
C-D4,5-T1-A30				
1	1036	67	932	1157
2	1020	53	965	1092

Tableau 3. Forces de perforation pour deux pointes normalisées.

Concernant la répétabilité, pour une même pointe l'écart-type est de l'ordre de 60N et l'écart entre les forces minimale et maximale est de l'ordre d'un peu plus de 230N. En prenant 2 écart-types, nous pouvons estimer que les résultats sur les forces de perforation sont précis à ± 120 N.

Les valeurs moyennes de la force de perforation obtenues avec les deux pointes sont respectivement de 1036N et 1020N. Cet écart est négligeable par rapport à l'écart de répétabilité. Il existe une bonne reproductibilité d'une pointe à une autre.

Déformation

Les résultats de déformation de l'insert sont indiqués sur la figure 11 et les valeurs moyennes, extrêmes et écart-types dans le tableau 4.

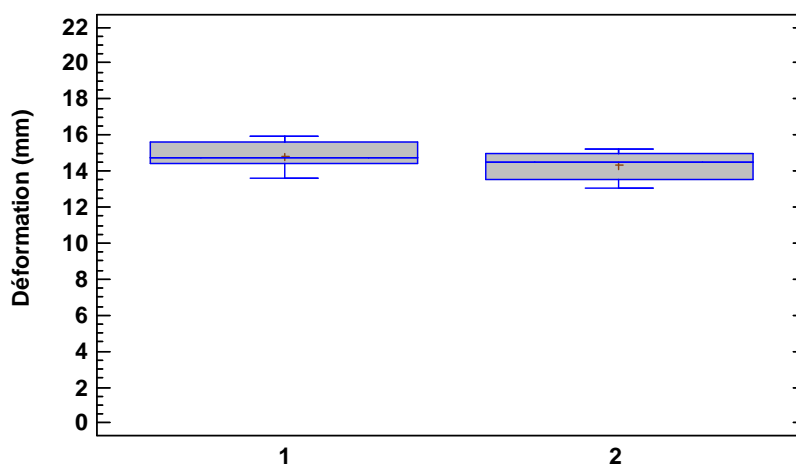


Figure 11. Déformations de l'insert pour deux pointes normalisées C-D4,5-T1-A30.

Pointe	Déformation moyenne (mm)	Ecart-type	Déformation minimale (mm)	Déformation maximale (mm)
C-D4,5-T1-A30				
1	14,8	0,8	13,6	15,9
2	14,3	0,8	13,0	15,2

Tableau 4. Déformations de l'insert pour deux pointes normalisées.

Concernant la répétabilité, l'écart-type est de l'ordre de 0,8 mm et l'écart entre les déformations minimale et maximale est de l'ordre d'un peu plus de 2,3 mm. En prenant 2 écart-types, nous pouvons estimer que les résultats sur les déformations sont précis à $\pm 1,6$ mm.

Les valeurs moyennes de la déformation obtenues avec les deux pointes sont respectivement de 14,8 et 14,3 mm. Cet écart est négligeable par rapport à l'écart de répétabilité. Il existe une bonne reproductibilité d'une pointe à une autre.

4.2. Géométrie des pointes

Influence de la forme, de la troncature et de l'angle de l'extrémité de la pointe

Force de perforation

La figure 12 et le tableau 6 en annexe B présentent la force de perforation obtenue avec des pointes coniques et pyramidales, dont l'extrémité a différentes valeurs de troncature (0, 1 et 2 mm). Le diamètre et l'angle de l'extrémité sont identiques pour les 6 pointes.

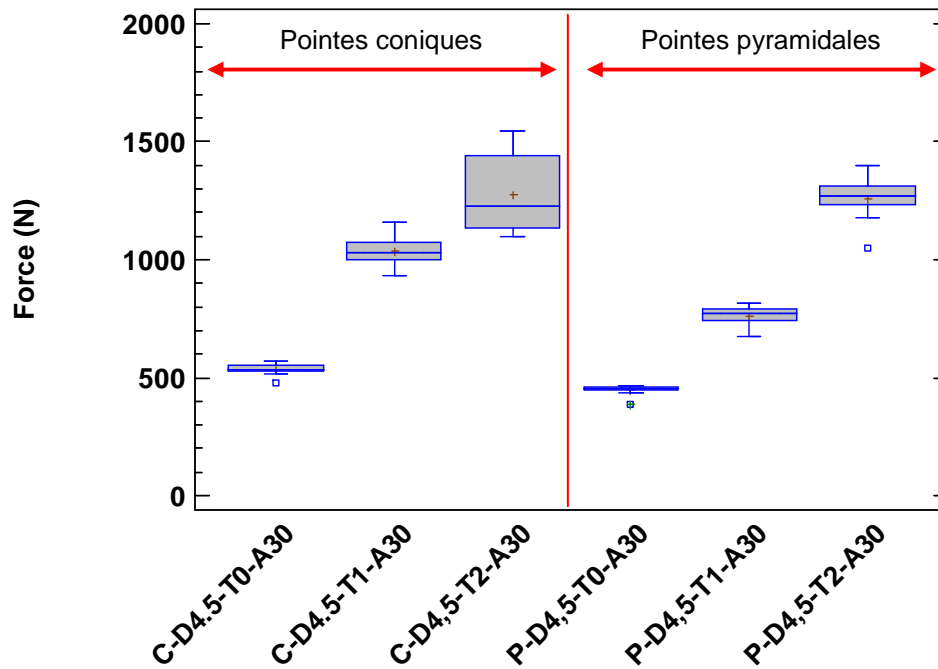


Figure 12. Forces de perforation en fonction de pointes de formes et troncatures différentes.

La force de perforation varie de manière significative en fonction de la géométrie de la pointe utilisée.

Pour une même géométrie de pointe, plus la troncature de l'extrémité est élevée, plus la force de perforation est importante. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une pointe fine va se glisser entre les mailles du textile, à l'opposé une pointe avec une troncature élevée va être retenue par les fils du textile.

Pour une même troncature, la force nécessaire pour perforer l'insert en textile est plus faible avec la pointe de forme pyramidale qu'avec celle de forme conique.

La figure 13 et le tableau 7 en annexe B présentent la force de perforation obtenue avec des pointes coniques, dont l'extrémité a différentes valeurs de troncature (0 et 1 mm) et d'angle (15°, 30° et 45°). Le diamètre est identique pour les 6 pointes.

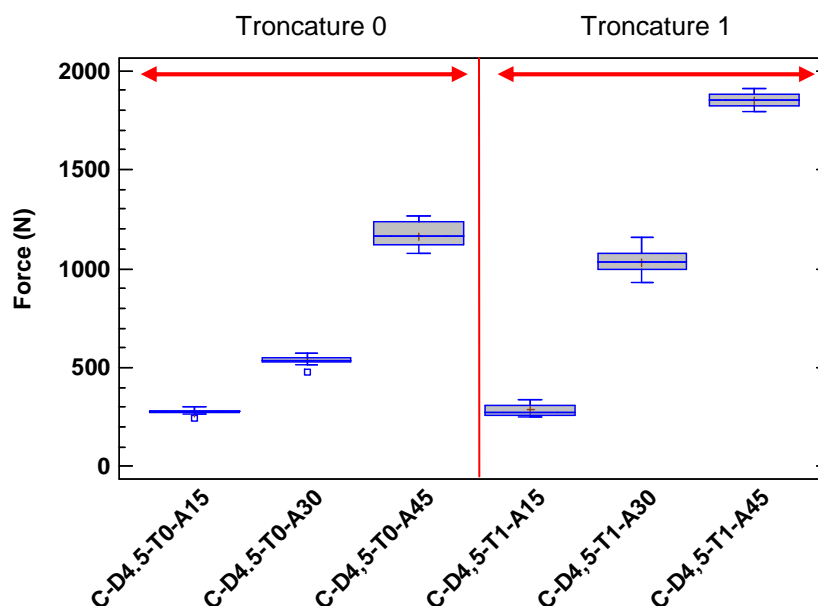


Figure 13. Forces de perforation en fonction de pointes d'angles et troncatures différents.

L'angle de la pointe a une très forte influence sur la force de perforation. Un angle plus aigu nécessite moins de force pour perforer les inserts. Pour les pointes ayant une troncature de 1 mm, il y a un rapport de 6 entre la force de perforation avec la pointe de 15° et celle de 45°. Ce paramètre devra être choisi judicieusement à savoir le plus représentatif possible des pointes trouvées in situ.

Déformation

La figure 14 et le tableau 8 en annexe B présentent les déformations obtenues avec des pointes coniques et pyramidales dont l'extrémité a différentes valeurs de troncature (0, 1 et 2 mm). Le diamètre et l'angle de l'extrémité sont identiques pour les 6 pointes.

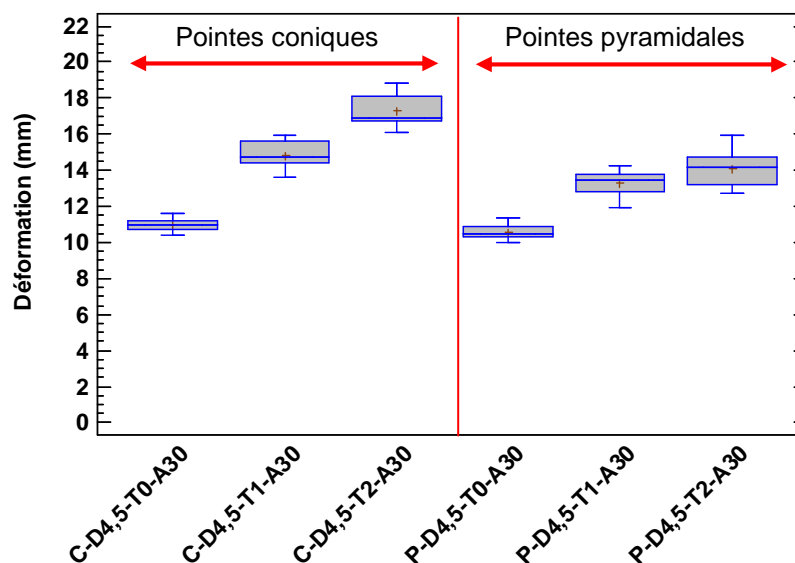


Figure 14. Déformations de l'insert en fonction de pointes de formes et troncatures différents.

La figure 15 et le tableau 9 en annexe B présentent les déformations obtenues avec des pointes coniques dont l'extrémité a différentes valeurs de troncature (0 et 1 mm) et d'angle (15°, 30° et 45°). Le diamètre est identique pour les 6 pointes.

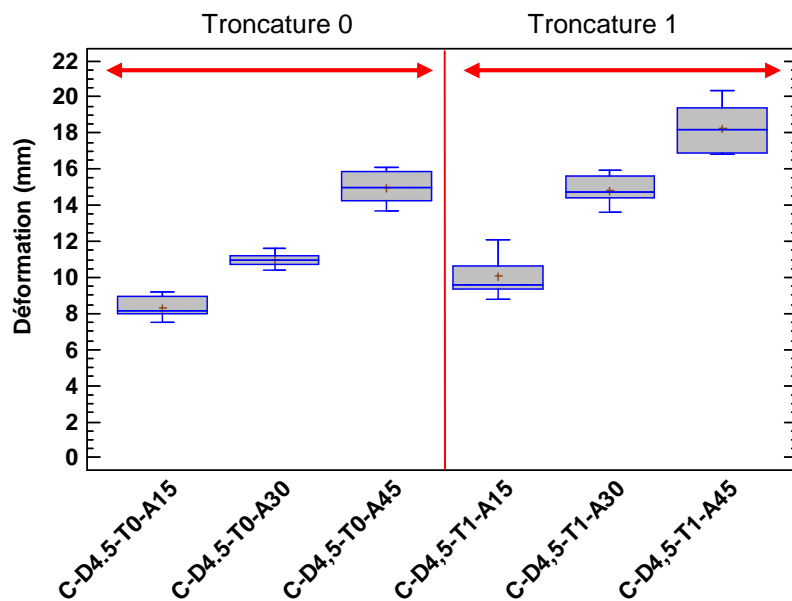


Figure 15. Déformations de l'insert en fonction de pointes d'angles et troncatures différents.

Les figures 12 et 13, comparées respectivement aux figures 14 et 15 montrent que la déformation de l'insert augmente lorsque la force de perforation augmente.

La géométrie des pointes a une influence identique sur la déformation et sur la force de perforation :

- pour une même géométrie de pointe, plus la troncature de l'extrémité est élevée, plus la déformation est importante,
- la déformation est plus importante pour une pointe conique que pour une pointe pyramidale,
- un angle plus aigu entrainera une déformation moindre.

Ces essais ont montré l'influence importante de la forme de l'extrémité de la pointe sur la force de perforation et la déformation des inserts. Nous avons donc effectué les essais suivants avec la pointe normalisée et avec des pointes se rapprochant au maximum de celles trouvées sur chantier, c'est-à-dire des pointes ayant une extrémité de forme pyramidale, avec un angle de 30° et une troncature de 1 mm.

Influence du diamètre de la pointe

Nous avons étudié uniquement l'influence du diamètre sur la force de perforation, à l'aide de pointes de forme pyramidale. La figure 16 et le tableau 10 en annexe B présentent la force de perforation obtenue avec des pointes pyramidales de diamètres 2,5, 3 et 4,5 mm. L'angle de l'extrémité est de 30° et la troncature de 1 mm.

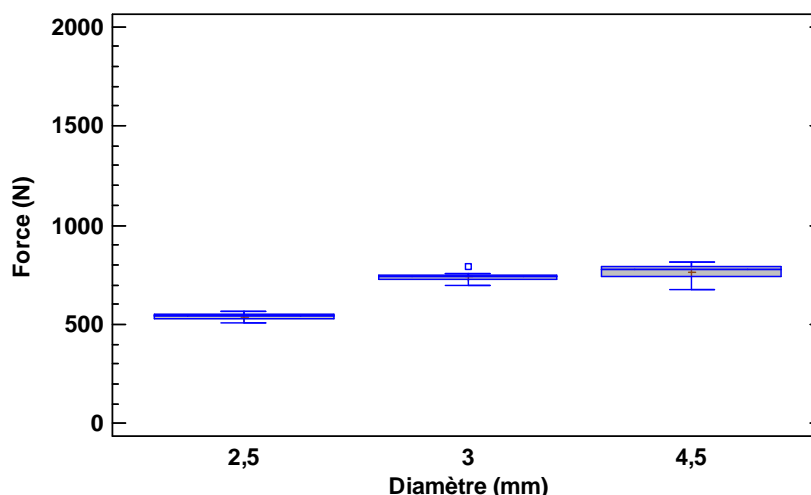


Figure 16. Forces de perforation en fonction du diamètre de la pointe d'extrémité pyramidale, de troncature 1 mm et d'angle 30°.

On constate une diminution des forces de perforation lorsque le diamètre diminue. Cette tendance est moins marquée lorsqu'on passe d'un diamètre 4,5 mm à 3 mm.

4.3. Vitesse de pénétration

La figure 17 et le tableau 11 en annexe B présentent la force de perforation obtenue avec des pointes conique et pyramidale, de diamètre 4,5 mm, dont l'extrémité a une troncature de 1 mm et un angle de 30°.

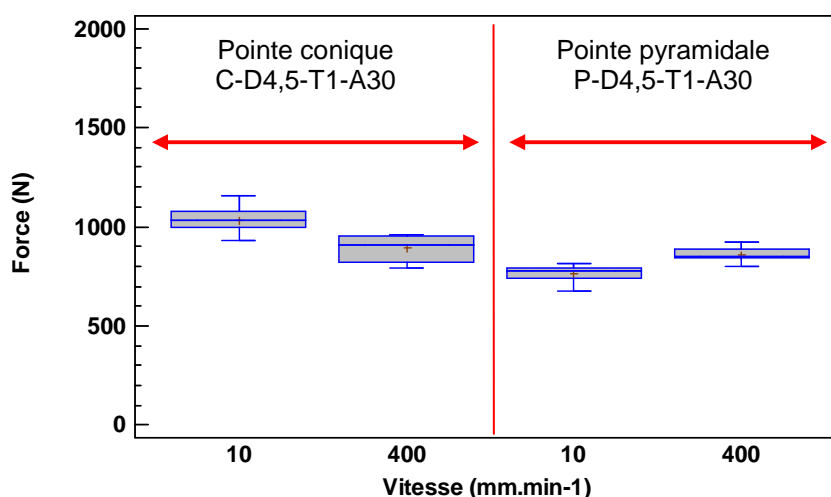


Figure 17. Forces de perforation pour deux vitesses de pénétration différentes.

Pour la pointe conique, les forces de perforation sont plus élevées pour une vitesse de 10 mm.min⁻¹ que pour une vitesse de 400 mm.min⁻¹, on observe une tendance inversée pour les pointes pyramidales.

Il n'a pas été possible de réaliser des essais à une vitesse plus élevée : la détection visuelle de la perforation est très difficile avec une vitesse de pénétration de 400 mm.min⁻¹. Par ailleurs, le nombre de points enregistrés par la machine de traction est plus faible, ceci entraîne une altération de la précision des résultats.

La mise en place d'un essai dynamique permettrait de se rapprocher des vitesses de pénétration mises en œuvre lors des accidents. Elle nécessiterait de définir, au préalable, un système de détection de perforation compatible avec la vitesse mise en jeu. A ce jour, aucun système simple et reproductible n'a été trouvé. Aucun essai dynamique n'a donc pu être proposé pour l'instant.

Au vue de ces résultats, il n'est pas envisagé d'augmenter la vitesse de pénétration avec cette méthode d'essai.

4.4. Diamètre du trou du porte-échantillon

Force de perforation

La figure 18 et le tableau 12 en annexe B présentent la force de perforation en fonction des différents diamètres du trou du porte-échantillon avec des pointes conique et pyramidale, de diamètre 4,5 mm, dont l'extrémité a une troncature de 1 mm et un angle de 30°.

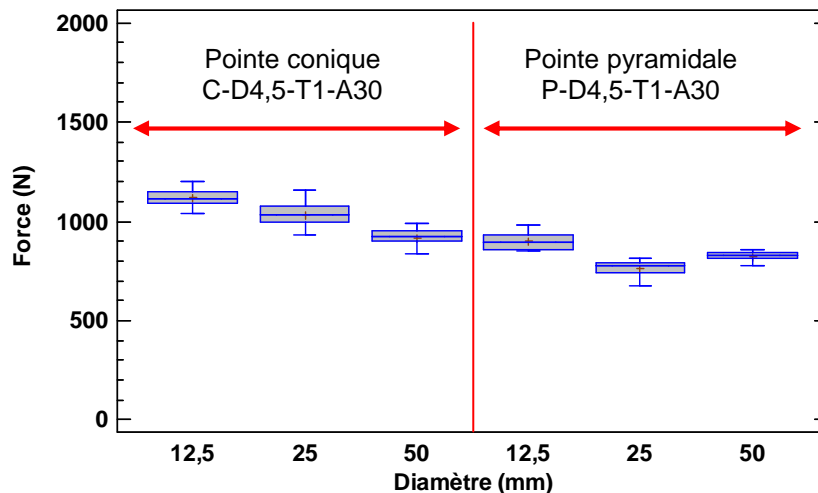


Figure 18. Forces de perforation pour différents diamètres de trou du porte-échantillon.

On peut noter une légère décroissance au niveau des forces de perforation pour les pointes coniques.

Pour les pointes pyramidales, la force de perforation diminue lorsque le diamètre du trou du porte-échantillon passe de 12,5 à 25 mm. Cette tendance s'inverse lorsqu'il varie de 25 à 50 mm, toutefois avec un impact modéré.

Déformation

La figure 19 et le tableau 13 en annexe B présentent la déformation de l'insert en fonction des différents diamètres du trou du porte-échantillon avec les pointes coniques et pyramidales.

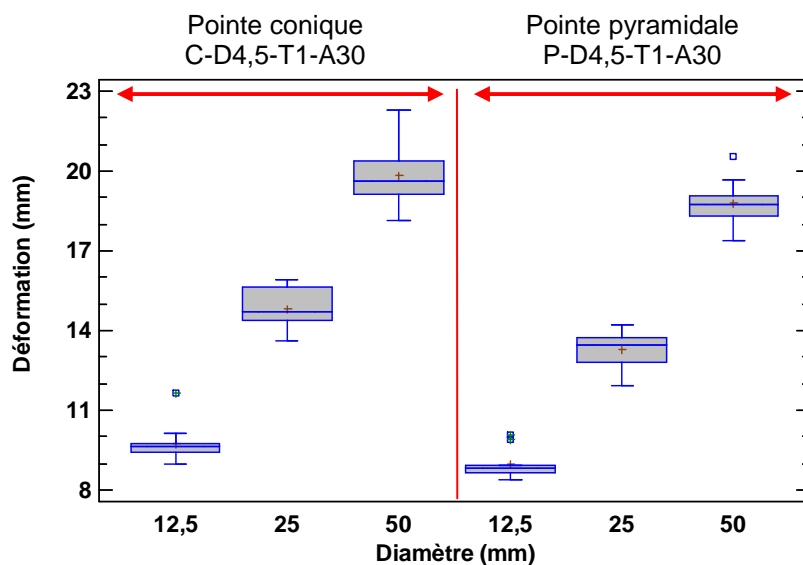


Figure 19. Déformations en fonction du diamètre du trou du porte-échantillon.

Quelle que soit la géométrie de la pointe (conique ou pyramidale), la déformation augmente pratiquement du simple au double lorsque le diamètre du trou du porte-échantillon varie entre 12,5 et 50 mm.

Compte-tenu des forces de perforation mesurées avec les pointes pyramidales, le diamètre de 25 mm semble pertinent et peut être conservé.

4.5. Qualités d'insert

Force de perforation

La figure 20 et le tableau 14 en annexe B présentent la force de perforation obtenue par 5 types d'inserts de qualités et origines différentes, en utilisant la pointe normalisée et deux pointes pyramidales de diamètres 3 et 4,5 mm. Les inserts sont décrits dans le tableau 5. L'insert n°1 est celui qui a servi pour établir les résultats précédents.

N° de l'insert	Fournisseur	Epaisseur (mm)	Masse surfacique (g.m ⁻²)
1	A	3,2	3153
2	A	3,9	2701
3	B	4,0	3798
4	B	4,0	6039
5	C	3,7	3592

Tableau 5. Caractéristiques des inserts.

Pour ces tests, la vitesse de pénétration est de 10 mm.min⁻¹, le diamètre du trou du porte-échantillon est de 25 mm.

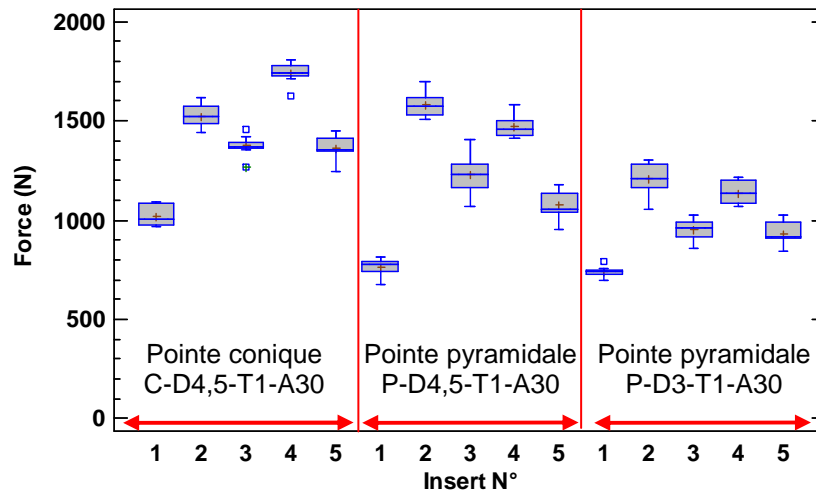


Figure 20. Forces de perforation en fonction des qualités d'insert.

On peut noter les résultats suivants :

- On retrouve les résultats obtenus précédemment : à diamètre égal, les forces de perforation restent plus faibles pour la pointe pyramidale que pour la pointe conique, sauf pour l'insert n°2.
- La pointe pyramidale de diamètre 3 mm entraîne une diminution marquée de la force de perforation par rapport à celle obtenue avec la pointe pyramidale de diamètre 4,5 mm, sauf pour l'insert n° 1. Le diamètre a une forte influence sur la force de perforation. Il doit être représentatif des pointes majoritairement trouvées sur chantier, c'est-à-dire de diamètre 3 mm.
- Pour la pointe normalisée, seul l'insert n° 1, choisi pour l'ensemble des tests, ne permet pas d'atteindre la valeur de 1100N préconisée par la norme. Pour les inserts n° 3 et 5, la force moyenne de perforation est au-dessus de 1300N, avec quelques valeurs en-dessous de cette limite. Les inserts n° 2 et 4 résistent à des forces de perforation supérieures à 1400N.
- Pour la pointe pyramidale de diamètre 4,5, seuls les inserts n° 2 et 4 sont validés avec la valeur de 1100N et le resteraient pour la valeur préconisée de 1300N.
- Avec la pointe pyramidale de diamètre 3 mm, aucun insert n'est capable d'atteindre la valeur de 1300N. Les inserts n°1, 3 et 5 ne résistent pas à la force de 1100N. Pour les inserts n° 2 et 4, la force moyenne de perforation est au-dessus de 1100N, avec quelques valeurs en-dessous de cette limite.

Déformation

La figure 21 et le tableau 15 en annexe B présentent la déformation des 5 types d'inserts, en utilisant la pointe normalisée et deux pointes pyramidales de diamètres 3 et 4,5 mm.

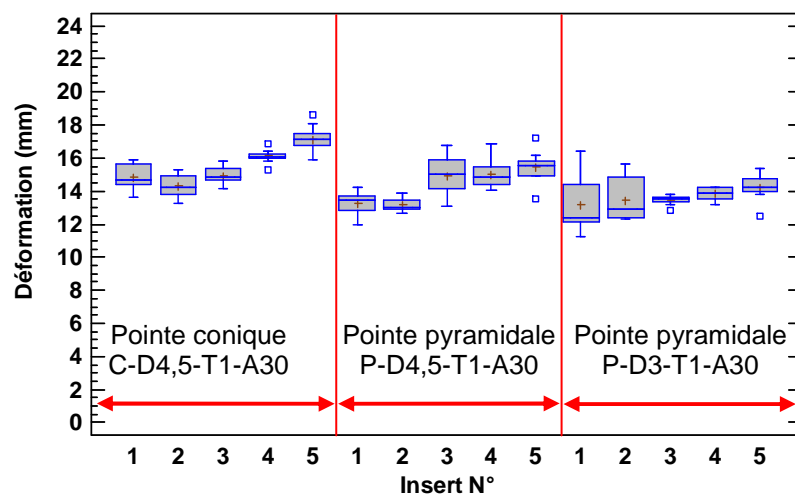


Figure 21. Déformations en fonction des qualités d'insert.

Les déformations varient entre 12 et 19 mm pour les différentes qualités de textile et les différentes pointes.

Si on prend en compte l'ensemble des inserts, il n'y a pas de relation entre la déformation et la force de perforation.

5. Conclusion

Cette étude portait sur l'essai normalisé de résistance à la perforation des inserts anti-perforation décrit dans les normes NF EN ISO 20344 : 2012 et NF EN 12568 : 2010. Elle avait pour objectif d'évaluer les paramètres de l'essai influençant la force de perforation et la déformation de l'insert et de proposer éventuellement une méthode d'essai adaptée aux inserts en textile et représentative des conditions réelles d'utilisation.

Cette étude a montré que :

- La valeur limite de la résistance à la perforation de 1100N, que doivent respecter les inserts pour satisfaire la norme, ne permet pas de protéger tous les salariés. L'INRS préconise d'élever sensiblement cette valeur à 1300N. Elle correspond à la force appliquée par une personne avec sa charge dont le poids total est de 95 kg et intègre l'effet dynamique lié à la marche.
- La pointe conique de diamètre 4,5 mm, utilisée dans la norme, n'est pas suffisamment représentative des pointes trouvées sur le chantier et sous-évalue le risque de perforation au niveau des inserts. La géométrie de la pointe est très importante au niveau des forces de perforation et de la déformation engendrée. L'INRS préconise d'utiliser une pointe similaire à celles trouvées majoritairement sur chantier, à savoir une pointe à extrémité pyramidale de diamètre 3 mm. L'angle de 30° et la troncature 1 mm sont conservés.
- L'importance de la vitesse de pénétration dans la limite explorée (10 - 400 mm.min⁻¹) n'est pas marquée. La vitesse spécifiée dans la norme peut être gardée dans le cadre de cet essai statique.
Cependant, la mise en place d'un essai dynamique permettrait de se rapprocher des vitesses de pénétration mises en œuvre lors des accidents. Elle nécessiterait de définir, au préalable, un système de détection de perforation compatible avec la vitesse mise en jeu. A ce jour, aucun système simple et reproductible n'a été trouvé. Aucun essai dynamique n'a donc pu être proposé pour l'instant.
- Le diamètre du trou du porte-échantillon influence essentiellement la déformation de l'insert mais n'a pas d'influence significative sur la force de perforation avec la pointe pyramidale. Le diamètre actuel de 25 mm peut être conservé.

Cinq types d'insert prélevés sur le marché ont été testés. Quatre d'entre eux répondent aux spécifications de la norme actuelle. Avec la nouvelle pointe préconisée, seuls deux inserts ont une force moyenne de perforation légèrement au-dessus de 1100N. Aucun ne résiste à une force de 1300N.

Les mécanismes de perforation des inserts en textile et des inserts acier sont différents. Pour les essais des semelles en acier, la pointe normalisée actuelle est bien dimensionnée et n'est pas remise en cause.

6. Bibliographie

- [1] NF EN ISO 20345 - Equipement de protection individuelle - Chaussures de sécurité. PARIS, AFNOR, Février 2012, 31 p.
- [2] NF EN ISO 20346 - Equipement de protection individuelle - Chaussures de protection. PARIS, AFNOR, Octobre 2004, 13 p.
- [3] NF EN ISO 20347 - Equipement de protection individuelle - Chaussures de travail. PARIS, AFNOR, Avril 2012, 13 p.
- [4] NF EN ISO 20344 - Equipement de protection individuelle - Méthodes d'essais pour les chaussures. PARIS, AFNOR, Février 2012, 92 p.
- [5] NF EN 12568 - Exigences et méthodes d'essais des embouts et des inserts anti-perforation. PARIS, AFNOR, Juillet 2010, 28 p.
- [6] L'OBSERVATOIRE DU MOUVEMENT - La marche. La lettre de l'Observatoire du Mouvement, Avril 2004, 11, pp. 1-12.
- [7] LAASSEL E.M., LOSLEVER P., VOISIN PH., HERLANT M. - Analyse multidirectionnelle des forces de réaction du pied au cours de la marche normale. Acta Orthopaedica Belgica, 58, 3, pp. 272-279.
- [8] IFTH - Synthèse Textile-Habillement. Le journal des professionnels du Textile et de l'Habillement, Février 2006, N°12 - Hors série, p. 4.
- [9] DE WIT B. et al. - Biomechanical analysis of the stance phase during barefoot and shot running. Journal of Biomechanics, 2000, 33, pp. 269-278.
- [10] CAZEAU C. - ANALYSE BIOMÉCANIQUE D'UNE SPÉCIFICITÉ DE LA BIPÉDIE HUMAINE: la mise en flexion dorsale de la cheville lors de l'appui. Maîtrise Orthopédique n°166, août 2007.
- [11] BÉNICHOU J., LIBOTTE M. - Le livre du pied et de la marche. Odile Jacob, 2002, 338 p.

Annexe A

Essai normalisé de perforation des inserts textiles NF EN ISO 20344 : 2012

L'équipement d'essai (cf. figure 22) est constitué d'une machine capable de générer et mesurer les forces compressives jusqu'au moins 2000 N. Elle est dotée d'un plateau de pression sur lequel la pointe d'essai (cf. figure 23) est fixée. Une plaque inférieure parallèle percée d'un trou de 25 mm de diamètre supporte la semelle à tester (éprouvette). La pointe d'essai a un diamètre de $(4,5 \pm 0,05)$ mm, et le bout est tronqué selon les formes et dimensions indiquées à la figure 23.

La pointe d'essai est plantée dans l'éprouvette, à une vitesse de (10 ± 3) mm/min, jusqu'à ce que la force requise de 1100 N soit atteinte. La machine est arrêtée. La semelle est contrôlée, par une inspection visuelle ou par une détection électrique ou cinématographique, pour détecter une éventuelle perforation.

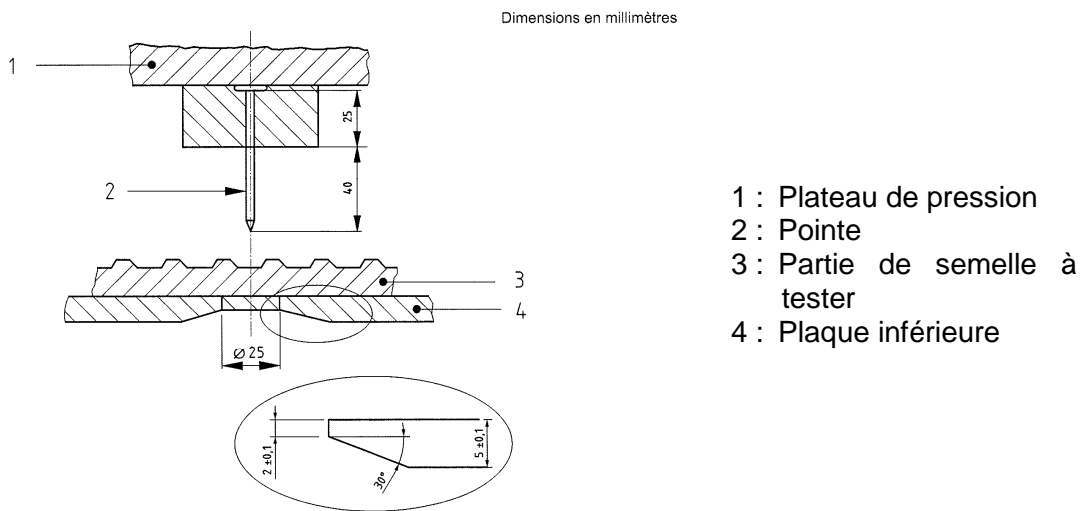


Figure 22. Appareillage pour l'essai de résistance à la perforation.

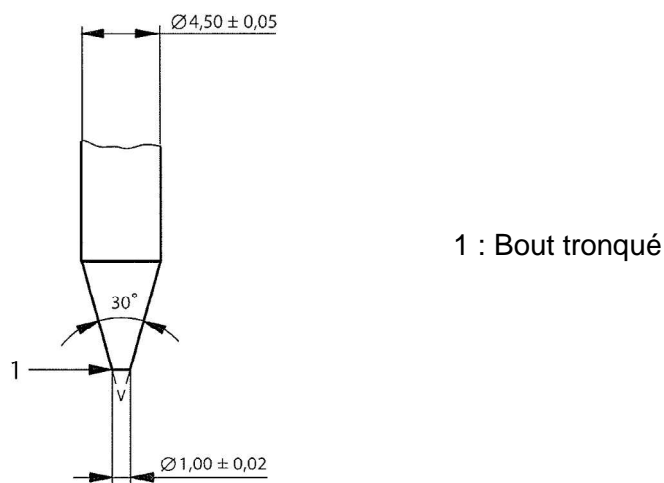


Figure 23. Pointe normalisée pour l'essai de résistance à la perforation.

Annexe B

Tableaux des résultats

Influence de la forme, de la tronçature et de l'angle de l'extrémité de la pointe

Force de perforation

Pointe	Force moyenne (N)	Ecart-type	Force minimale (N)	Force maximale (N)
C-D4,5-T0-A30	534	25	479	571
C-D4,5-T1-A30	1036	67	932	1157
C-D4,5-T2-A30	1275	161	1101	1543
P-D4,5-T0-A30	447	23	386	467
P-D4,5-T1-A30	742	64	612	813
P-D4,5-T2-A30	1256	95	1050	1399

Tableau 6. Forces de perforation en fonction de pointes de formes et tronçatures différentes.

Pointe	Force moyenne (N)	Ecart-type	Force minimale (N)	Force maximale (N)
C-D4,5-T0-A15	276	14	246	300
C-D4,5-T0-A30	534	25	479	571
C-D4,5-T0-A45	1166	67	1076	1268
C-D4,5-T1-A15	284	27	255	338
C-D4,5-T1-A30	1036	67	932	1157
C-D4,5-T1-A45	1853	34	1795	1907

Tableau 7. Forces de perforation en fonction de pointes d'angles et tronçatures différents.

Déformation

Pointe	Déformation moyenne (mm)	Ecart-type	Déformation minimale (mm)	Déformation maximale (mm)
C-D4,5-T0-A30	12,3	1,6	10,4	11,6
C-D4,5-T1-A30	14,8	0,8	13,6	15,9
C-D4,5-T2-A30	17,1	0,8	16,1	18,8
P-D4,5-T0-A30	10,6	0,4	10,0	11,4
P-D4,5-T1-A30	13,3	0,7	12,0	14,2
P-D4,5-T2-A30	16,0	0,6	15,3	17,3

Tableau 8. Déformations de l'insert en fonction de pointes de formes et tronçatures différentes.

Pointe	Déformation moyenne (mm)	Ecart-type	Déformation minimale (mm)	Déformation maximale (mm)
C-D4,5-T0-A15	8,3	0,6	6,9	9,2
C-D4,5-T0-A30	12,3	1,6	10,4	11,6
C-D4,5-T0-A45	15,0	0,9	13,7	13,1
C-D4,5-T1-A15	10,1	1,1	8,8	12,1
C-D4,5-T1-A30	14,8	0,8	13,6	15,9
C-D4,5-T1-A45	18,3	1,3	16,8	20,3

Tableau 9. Déformations de l'insert en fonction de pointes d'angles et tronçatures différents.

Influence du diamètre de la pointe

Pointe	Force moyenne (N)	Ecart-type	Force minimale (N)	Force maximale (N)
P-D2,5-T0-A30	537	19	508	566
P-D3-T1-A30	737	27	694	790
P-D4,5-T2-A30	742	64	612	813

Tableau 10. Forces de perforation en fonction du diamètre de la pointe pyramidale.

Vitesse de pénétration

Pointe	Vitesse de pénétration (mm.min ⁻¹)	Force moyenne (N)	Ecart-type	Force minimale (N)	Force maximale (N)
C-D4,5-T1-A30	10	1036	67	932	1157
	400	839	67	791	963
P-D4,5-T1-A30	10	742	64	612	813
	400	892	34	841	935

Tableau 11. Forces de perforation pour deux vitesses de pénétration différentes.

Diamètre du trou du porte-échantillon

Force de perforation

Pointe	Diamètre du trou du porte-échantillon (mm)	Force moyenne (N)	Ecart-type	Force minimale (N)	Force maximale (N)
C-D4,5-T1-A30	12,5	1117	48	1037	1202
	25	1036	67	932	1157
	50	930	58	833	1000
P-D4,5-T1-A30	12,5	900	42	853	981
	25	742	64	612	813
	50	824	26	776	855

Tableau 12. Forces de perforation pour différents diamètres du trou du porte-échantillon.

Déformation

Pointe	Diamètre du trou du porte-échantillon (mm)	Déformation moyenne (mm)	Ecart-type	Déformation minimale (mm)	Déformation maximale (mm)
C-D4,5-T1-A30	12,5	9,8	0,8	11,7	11,7
	25	14,8	0,8	13,6	15,9
	50	20,0	1,3	18,2	22,3
P-D4,5-T1-A30	12,5	9,0	0,6	8,4	10,1
	25	13,3	0,7	12,0	14,2
	50	18,8	0,9	17,4	20,6

Tableau 13. Déformations en fonction du diamètre du trou du porte-échantillon.

Qualités d'insert

Force de perforation

Pointe	Insert	Force moyenne (N)	Ecart-type	Force minimale (N)	Force maximale (N)
C-D4,5-T1-A30	1	1036	67	932	1157
	2	1526	55	1441	1615
	3	1375	49	1270	1459
	4	1742	51	1625	1806
	5	1353	56	1248	1449
P-D4,5-T1-A30	1	742	64	612	813
	2	1581	60	1510	1695
	3	1230	105	1066	1405
	4	1472	56	1414	1578
	5	1074	68	952	1178
P-D3-T1-A30	1	737	27	694	790
	2	1206	87	1053	1302
	3	952	55	857	1022
	4	1139	54	1072	1216
	5	934	60	843	1025

Tableau 14. Forces de perforation en fonction des qualités d'insert.

Déformation

Pointe	Insert	Déformation Moyenne (mm)	Ecart-type	Déformation Minimale (mm)	Déformation Maximale (mm)
C-D4,5-T1-A30	1	14,8	0,8	13,6	15,9
	2	14,3	0,7	13,3	15,3
	3	14,9	0,5	14,1	15,8
	4	16,1	0,4	15,3	16,9
	5	17,3	0,8	15,9	18,7
P-D4,5-T1-A30	1	13,3	0,7	12	14,2
	2	13,2	0,4	12,6	13,9
	3	14,9	1,2	13,1	16,8
	4	15	0,8	14,1	16,8
	5	15,4	1,	13,6	17,2
P-D3-T1-A30	1	13,2	1,7	11,3	16,4
	2	13,4	1,3	12,3	15,6
	3	13,4	0,3	12,8	13,8
	4	13,9	0,4	13,2	14,3
	5	14,2	0,8	12,4	15,3

Tableau 15. Déformations en fonction des qualités d'insert.