

ÉTUDE DE LA TENUE MÉCANIQUE DES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELLE AUX JETS D'EAU À TRÈS HAUTE PRESSION

La technique du nettoyage/décapage utilisant de l'eau à très haute pression (THP) se généralise et, de ce fait, on note une augmentation du nombre d'accidents graves. C'est la raison pour laquelle un groupe d'utilisateurs a demandé à l'INRS d'examiner le problème relatif aux Equipements de Protection Individuelle (EPI) aptes à résister aux agressions physiques des jets d'eau à THP. L'objectif de l'étude est double : mettre au point une méthodologie d'essai et définir et tester des concepts de matériaux susceptibles de mieux résister aux jets d'eau THP.

Une première phase a permis de définir les limites techniques de l'étude en fonction des conditions d'accidents observées et de l'état de l'art du moment : pression < 500 bars, lance tenue à la main, jet rond, protection des membres inférieurs.

Après l'acquisition d'une pompe haute pression, un support d'échantillon représentant le mieux possible les conditions réelles et, en particulier, la présence de l'opérateur a été mis au point. Il est composé d'un empilement de mousses avec des caractéristiques spécifiques, d'une couche de détection du percement représentative de la peau et d'un système de maintien du matériau de protection.

L'évaluation de l'influence de la distance buse/échantillon et de la vitesse de passage en fonction de la pression de perforation a permis de déterminer les spécifications et la méthode d'essai.

La pression du jet et la force de recul de la lance sont des paramètres variables, liés au niveau de protection revendiqué pour l'EPI.

Les matériaux susceptibles d'être employés dans la fabrication des vêtements de protection sont les textiles enduits composés de fils ayant des caractéristiques mécaniques élevées qui résistent le mieux dans la gamme des pressions étudiées. L'intérêt de l'enduction est de maintenir les fils solidaires lors de l'impact. Par ailleurs, des essais ont permis de montrer que pour accroître la résistance au jet d'eau THP, la solution la plus adaptée pour une pression inférieure à 500 bars et un débit inférieur à 30 l/min est la multiplication du nombre de couches de textiles dans la fabrication de l'EPI.

La technique du nettoyage/décapage utilisant de l'eau à haute pression (HP) et très haute pression (THP, soit plusieurs centaines de bars) devient concurrentielle vis-à-vis du sablage et son utilisation, marginale il y a peu, se généralise. De ce fait, on note une nette augmentation du

nombre d'accidents graves, voire mortels, causés par l'agression physique du jet. Cette situation est probablement destinée à encore évoluer dans un futur proche, du fait de l'élargissement des utilisations de cette technique et de la baisse des coûts de ce type de matériel.

- Nettoyage au jet
- Eau
- Pression
- Protection individuelle
- Banc d'essai

► Patrice MARCHAL, Michel JACQUES,
INRS, Département Ingénierie
des équipements de travail

STUDY OF THE PPE FABRIC RESISTANCE TO VERY HIGH PRESSURE WATER JETS

The cleaning/stripping method using very high pressure (VHP) water is becoming widespread, resulting in an increase in the number of serious accidents. A user group therefore requested INRS to investigate the problem in relation to Personal Protective Equipment (PPE) capable of resisting physical aggression from VHP water jets. The study aim was twofold: to establish testing methodology and to define and test material designs likely to resist better VHP water jets.

A first phase allowed us to define the study technical scope in terms of the observed accident conditions and the existing state of the art: pressure < 500 bar, hand-held lance, round jet, lower limb protection.

After acquiring a high-pressure pump, a sample support was designed to represent as closely as possible real conditions, especially operator presence. This support comprised a stack of foam with specific characteristics, a perforation detection layer representing the skin and a protection material retaining system.

Testing method specifications could be determined by evaluating nozzle/sample distance and passing speed with respect to the perforation pressure.

Jet pressure and lance recoil force are variable parameters linked to the level of protection claimed for the PPE.

Materials likely to be used in manufacturing protective clothing are coated fabrics made up of threads with high-strength characteristics, which resist better within the studied pressure range. The advantage of fabric coating is that it keeps the threads together when the fabric is subjected to impact. Moreover, tests enabled us to show that the most appropriate solution to increasing VHP water jet resistance at pressures less than 500 bar and delivery flows less than 30 l/min is to multiply the number of fabric layers, when manufacturing PPE.

- Jet cleaning
- Water
- Pressure
- Personal protection
- Test bench

Afin d'évaluer l'aptitude des équipements de protection individuelle (EPI) disponibles et de proposer éventuellement des voies d'amélioration de la résistance de ces EPI, l'INRS a engagé une étude dont l'objectif est double :

- d'une part, mettre au point une méthodologie d'essai visant à retrouver sur banc d'essai, avec un échantillon de matériau de protection, des résultats analogues à ceux rencontrés dans des situations réelles avec des conditions voisines,

- d'autre part, définir et tester des concepts de matériaux susceptibles de fournir une résistance suffisante aux jets THP et qui pourront entrer dans la fabrication des EPI spécifiques aux professions concernées.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Lors d'une étude préalable, une analyse des risques et une recherche relative aux accidents mettant en cause des jets d'eau THP ont été effectuées sur la base d'informations fournies par les CRAM afin d'en déterminer les causes, le matériel utilisé, les conditions de travail et les zones de lésions.

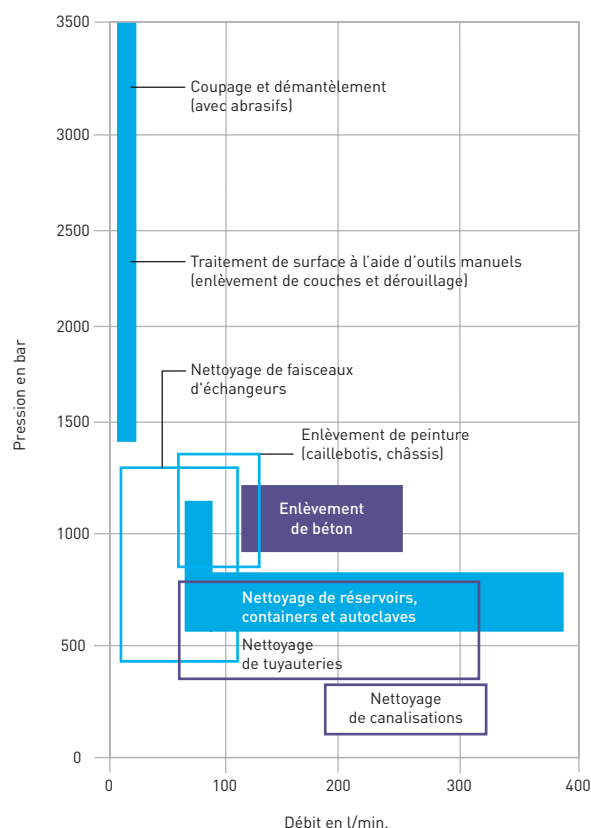
Cette première phase a conduit à limiter l'étude aux caractéristiques les plus souvent rencontrées lors d'accidents, à choisir la pompe haute pression nécessaire à la mise au point du banc d'essai et à rechercher du matériel de protection. Une étude théorique a été réalisée afin de décrire physiquement le jet, de déterminer les paramètres influents en décapage et de comprendre l'impact du jet sur la cible.

La deuxième phase a consisté à mettre au point un banc d'essai en recherchant :

- une matière susceptible de représenter mécaniquement la peau et le corps,
- la dimension appropriée de l'échantillon et sa fixation sur le support,
- le moyen de détection du percement de la peau et, donc, de l'échantillon de protection,
- l'influence des différents paramètres (diamètre de buse, distance buse/échantillon, vitesse de passage) sur l'efficacité de perforation du jet, c'est-à-dire la pression nécessaire pour traverser un même matériau.

FIGURE 1

Représentation des différentes applications
Representation of different applications



La dernière phase a été la recherche de matériaux ou concepts résistants au jet THP et susceptibles d'être employés pour la fabrication d'un EPI. Cette recherche s'est effectuée sur un échantillonnage de matériaux de différentes technologies (tricoté, tissé, molletonné, collé, etc.) actuellement disponibles sur le marché pour ensuite se concentrer sur les tissus les plus résistants et ayant un comportement prometteur.

Pour compléter cette étude et comprendre l'intérêt des entreprises pour cette nouvelle méthode de nettoyage/décapage, une analyse des procédés alternatifs a été réalisée.

RÉSULTATS

LIMITES DE L'ÉTUDE

L'analyse bibliographique [1, 2] a permis de situer les différentes applications de la technologie de l'eau sous

pression en fonction des pressions et des débits (cf. Figure 1).

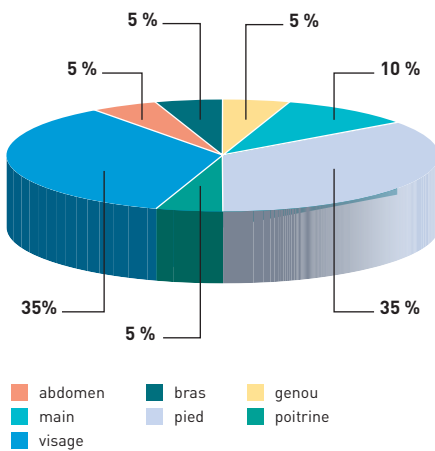
Malgré d'abondants documents sur les jets d'eau THP [3, 4, 5, 6 et 7], aucune étude spécifique sur la résistance des EPI contre les jets d'eau n'a été trouvée et très peu de recherches sont effectuées sur le décapage au jet d'eau pure THP. Actuellement, les améliorations techniques et les axes de recherche portent principalement sur le découpage et le décapage au jet d'eau chargé en abrasif.

L'accroissement du taux d'utilisation du procédé de nettoyage/décapage aux jets d'eau sous haute et très haute pression constaté ces dernières années entraîne une augmentation importante des accidents survenus lors de travaux utilisant cette technologie. Le diagramme de la Figure 2 en montre un aperçu en termes de zones de lésions du corps humain.

Les systèmes automatisés ne sont évidemment pas concernés par cette étude car ils sont conçus pour être commandés à distance et éviter ainsi

FIGURE 2

Répartition des zones de lésions Distribution of injury zones



tout contact de l'opérateur avec le jet d'eau THP.

Les tâches de débouchage des canalisations et autres tuyaux qui font appel à la technique spécifique du jet à réaction, type "furet", responsable de la quasi-totalité des blessures graves de la face ne font également pas partie de l'étude. En effet, dans ce type d'accident, les mécanismes sont différents dans la mesure où c'est le fouettement de la lance qui conduit parfois à un impact avec la tête de l'utilisateur. C'est pourquoi, il n'est pas envisagé pour l'instant d'étudier le cas des casques et des écrans faciaux.

Par contre, lors du nettoyage/décapage avec une lance tenue à la main, c'est très souvent le jet qui blesse les parties inférieures de l'opérateur, en le coupant ou en le perforant avec des conséquences généralement graves. Chaque blessure doit être traitée avec précaution pour éviter les risques élevés d'infection.

Lors de l'enquête auprès des CRAM, les situations d'accidents recensés en 2000 rencontrées lors de nettoyage/décapage sont caractérisées par les paramètres suivants :

- travaux effectués avec la lance tenue à la main,
- réaction maximale du jet au niveau de la lance : 200 N,
- pression comprise entre 100 et 400 bars,
- débit compris respectivement entre 100 l/min et 30 l/min.

FIGURE 3

Lance simple gâchette Lance with single trigger



FIGURE 4

Lance simple gâchette avec crosse Lance with simple trigger and butt



FIGURE 5

Lance double gâchette avec crosse Lance with double trigger and butt



À cette période, les pressions d'utilisation les plus fréquemment indiquées par les fabricants et les utilisateurs étaient d'environ 400 bars. Les parties du corps touchées directement par les jets d'eau THP sont principalement les membres et, dans une moindre mesure, le tronc.

Cette étude se limite donc aux vêtements de protection couvrant le tronc et les membres pour éviter la perforation ou la coupure de l'opérateur.

Les *Figures 3, 4 et 5* présentent différents types de lances utilisées en fonction des travaux à effectuer et de la pression d'utilisation. Les lances simple gâchette sont particulièrement dangereuses car elles peuvent être enclenchées avec une seule main ce qui rend leur manipulation aléatoire. Les lances double gâchette obligent l'opérateur à agir avec ses deux mains permettant une utilisation plus sûre.

L'analyse des risques, l'étude bibliographique et l'enquête auprès des CRAM ont donc permis d'obtenir les informations nécessaires pour déterminer le cadre de l'étude et les caractéristiques de la pompe HP la plus proche de celle utilisée par les opérateurs.

ANALYSE THÉORIQUE [8]

Phénomènes agissant dans le nettoyage et le décapage au jet d'eau HP et THP

Décapage par jet d'eau pure THP

Une opération de décapage par jet d'eau pure THP consiste à enlever du substrat un matériau devenu inutilisable ou endommagé, en vue de réaliser une opération de restauration. Logiquement, le décapage doit se faire sans altérer, ni changer la structure du substrat tout en assurant des critères de qualité (sélectivité, uniformité, etc.).

Nettoyage par jet d'eau pure THP

Le nettoyage consiste à éliminer du substrat un ou des matériaux devenus inutilisables ou qui se sont déposés. Comme pour le décapage, le nettoyage doit se faire sans altérer, ni changer la structure du substrat.

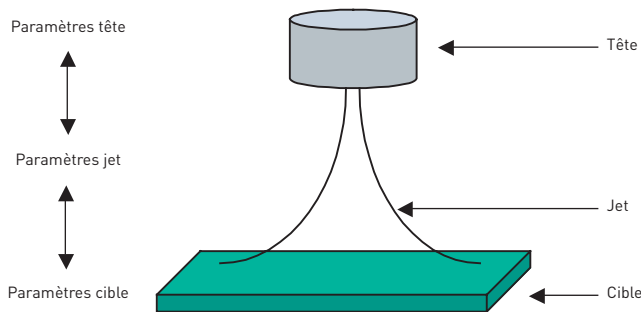
Ceci nous amène à présenter les paramètres influençant l'évolution du nettoyage et du décapage par jet d'eau THP (cf. *Figure 6*).

Paramètres de la tête

Ils englobent la géométrie de la buse, la pression de travail et le débit d'eau.

FIGURE 6

Visualisation schématique d'un jet
Diagrammatic view of a jet



Paramètres du jet

Ils concernent la formation du jet dans l'air : l'évasement du jet, sa structure cinétique, son inclinaison par rapport à la cible, la distance de tir et les propriétés physiques du fluide (masse volumique, viscosité, etc.).

Paramètres de la cible

Ils concernent les caractéristiques mécaniques intrinsèques ainsi que les propriétés physico-chimiques des matériaux (dépôt et substrat).

Il est difficile de définir les caractéristiques de la tête et du jet en fonction de la cible, la combinaison de ces trois ensembles de paramètres constituant un ensemble complexe à définir pour optimiser le nettoyage/décapage par jet d'eau THP.

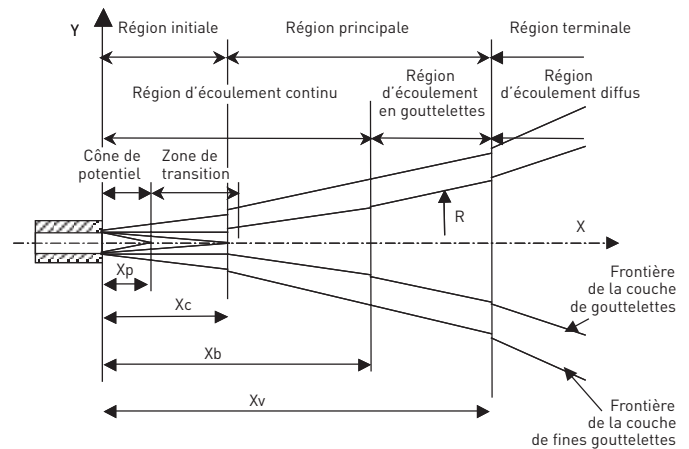
Description physique d'un jet continu

Il existe différents types de jets : pulsés, cavitants, modulés et continus. Le jet continu, très utilisé sur site, est, de loin, le plus répandu dans les installations industrielles particulièrement pour le nettoyage/décapage, en raison de sa relative simplicité de mise en œuvre. Seuls les jets continus sont donc étudiés ici.

Ces jets sont obtenus en maintenant une pression et un débit quasi-constants. La Figure 7 présente la structure d'un jet continu.

FIGURE 7

Structure du jet THP
VHP jet structure



Répartition cinétique

À l'aide de la pompe THP, l'eau est comprimée à des pressions très élevées pour sortir à travers un orifice de très petit diamètre. Se retrouvant à la pression atmosphérique, toute son énergie potentielle se transforme en énergie cinétique ; elle acquiert alors une grande vitesse, le jet comportant alors 3 régions.

Région initiale

À la sortie de la buse, la vitesse du jet est supposée uniforme. Cette zone se décompose en deux parties :

■ cône potentiel $X \leq X_p$.

Dans cette partie, la vitesse est uniforme.

■ zone de transition $X_p \leq X \leq X_c$.

Dans cette partie, la couche limite se développe de part et d'autre de l'axe et seul le point correspondant à l'axe du jet est animé de la même vitesse que celle de sortie (au niveau de la buse). La distribution des vitesses dans cette section est de forme gaussienne.

La région initiale se termine lorsque les couches limites se rejoignent.

Région principale $X_c \leq X \leq X_v$

La distribution des vitesses est dans cette zone de forme gaussienne. Par contre, la vitesse commence à décroître.

Région terminale

Cette zone se caractérise par une chute importante et très rapide de la vitesse. Le jet se transforme en brouillard de gouttelettes.

Répartition phasique

C'est une répartition du point de vue de la nature de l'écoulement, c'est-à-dire l'état de la phase liquide (continue ou discontinue). Nous pouvons également distinguer trois zones.

Région d'écoulement continu

$X \leq X_b$

Cette région se caractérise par une colonne d'eau au centre du jet. Cette colonne se compose d'une phase continue : l'eau.

Région d'écoulement en gouttelettes

$X_b \leq X \leq X_v$

Dans cette région, des couches de gouttelettes apparaissent autour de la phase eau continue. Ces gouttelettes sont les conséquences de la friction de la phase eau avec l'air et marquent le début de la chute du pouvoir d'érosion du jet.

Région d'écoulement diffus $X \geq X_v$

Cette région se compose en deux phases, une phase eau réduite en gouttelettes très fines formant un brouillard sans aucune potentialité et une phase dominante qui est l'air.

Cette description qualitative d'un jet dans l'air montre la complexité de son champ d'écoulement. Elle met en évidence la composition biphasique du jet.

YANAIDA et OHASHI [9] ont montré que le rayon du jet R dans la zone à gouttelettes situé à une distance X de la buse s'exprime sous la forme suivante :

■ $R = C_{ev} X$

FIGURE 8

Représentation des forces dans un jet d'eau THP Representation of forces within a VHP water jet

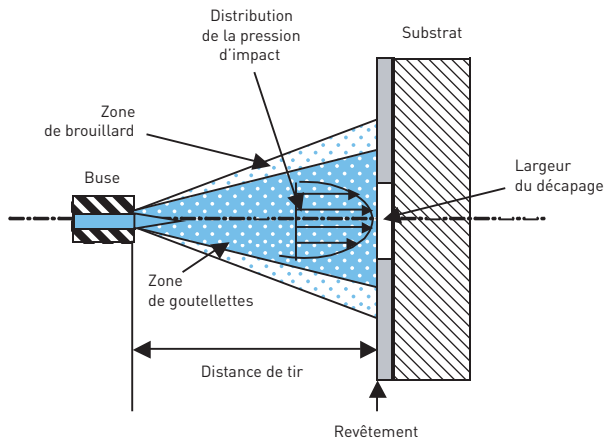
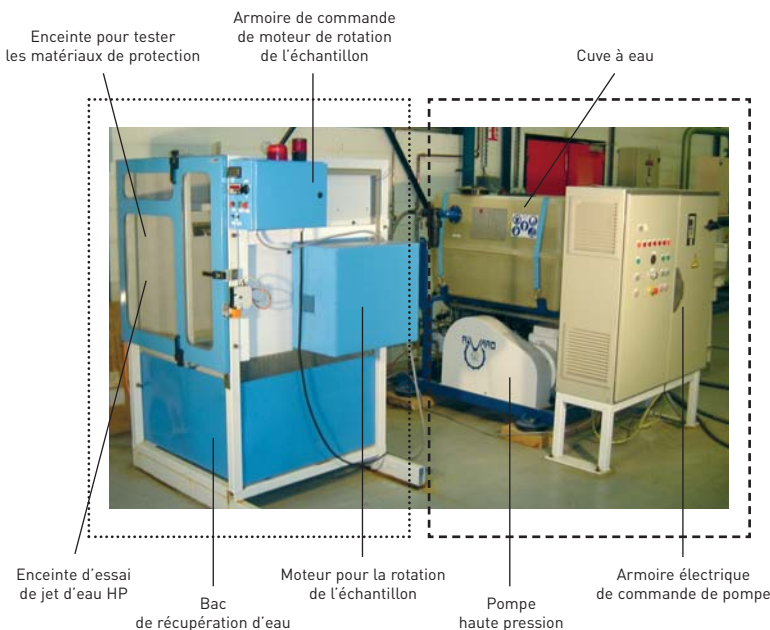


FIGURE 9

Banc d'essai jet d'eau THP VHP water jet test bench



Cev : coefficient d'évasement du jet.
Selon les auteurs :
Cev = 0,03 pour la région principale,
Cev = 0,06 pour la région diffuse.

Ce coefficient dépend de la pression et du diamètre de la buse. Mais les auteurs n'ont pas trouvé dans la littérature de relation expliquant cette dépendance. Ils ont donc supposé, dans

leur formulation du problème, que le coefficient Cev est indépendant de la pression P et du diamètre de la buse.

Ils ont supposé également que dans la région principale, le jet était constitué d'un nuage de gouttelettes entouré par une zone de brouillard ou fines gouttelettes (cf. Figure 7).

Répartition de la pression hydrodynamique du jet (Figure 8)

La région initiale du jet correspond à une pression hydrodynamique constante. Dans la région principale, la pression décroît sous l'effet de la pénétration de l'air dans le jet.

YANAIDA [12] corrèle, pour la zone principale, la variation de la pression du jet dans chacune de ses sections par l'équation suivante :

$$\frac{P}{P_a} = f(w) = (1-w^{1,5})^2$$

avec :

$$w = r/R$$

où :

- Pa pression hydrodynamique sur l'axe du jet,
- P pression hydrodynamique appliquée sur une surface infinitésimale située dans une section du jet,
- r rayon du jet en un point de la section située dans la zone principale,
- R largeur du jet dans la zone principale.

Suite à des observations expérimentales, M.C.LEU, P. MENG & E.S. GESKIN, L. TISMENESKIY [3] ont montré que l'influence de la distance de tir sur la variation de largeur du jet est fonction de deux facteurs :

- la structure du jet : sa largeur croît linéairement avec la distance de tir,
- la pression d'impact : elle décroît quand la distance de tir augmente.

Ils ont également montré qu'il existe une distance de tir critique à partir de laquelle la pression d'impact du jet devient suffisamment faible pour que le revêtement ne soit plus enlevé.

L'analyse bibliographique a permis d'identifier les mécanismes physiques liés au décapage et au décapage avec de l'eau pure. Ils sont de trois types.

■ Selon M. MABROUKI [8] : nous sommes en présence d'une onde de choc. Au moment de l'impact du jet d'eau pure avec le matériau, il se produit une onde de choc.

■ Selon M. HASHISH et M.P. du PLESSIS [10] : nous sommes en présence d'un phénomène de compression du matériau. Ils ont conclu qu'au cours du décapage par jet d'eau très

FIGURE 10

Schéma de l'embout type NIOH
Diagram of NIOSH-type tip

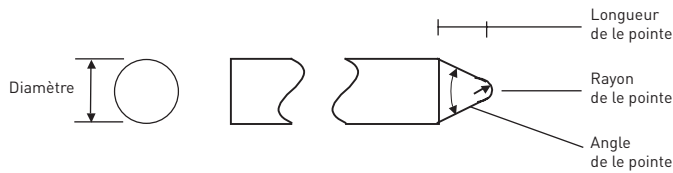


TABLEAU I

Cotes des pointes utilisées par le NIOSH
Dimension of tips used by NIOSH

| Type de pointe | Angle de la pointe (degrés) | Diamètre (mm) | Rayon de l'extrémité (mm) | Longueur de l'extrémité (mm) |
|----------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|------------------------------|
| A | 48 | 4,06 | 0,57 | 3,55 |
| B | 38 | 3,22 | 0,44 | 3,81 |
| C 50 | 2,43 | 0,43 | 2,79 | |
| D | 45 | 2,38 | 0,41 | 2,54 |
| E | 26 | 2,03 | 0,25 | 2,79 |

haute pression il y a rupture essentiellement en compression.

■ Selon M. REHBINDER [11] : nous sommes en présence d'un phénomène de traction car, quelle que soit l'énergie du jet, il pénètre à l'intérieur du matériau et provoque la rupture si la pression qu'il engendre entre les grains du matériau est suffisante pour les séparer les uns des autres.

Ces différentes explications s'appliquent pour des conditions d'essais qui ne sont pas rigoureusement identiques. En conclusion, nos essais ne sont pas de nature à invalider ou confirmer ces analyses. On peut penser que les trois phénomènes existent avec un degré d'influence en fonction des paramètres du jet, du matériau à enlever, du substrat, etc.

MISE AU POINT DE LA MÉTHODE D'ESSAI

Principe général du banc

Le banc d'essai est composé de deux parties comme le montre la Figure 9.

La première partie est constituée de la pompe haute pression, d'une cuve à eau servant de bac tampon et d'une armoire de commande permettant la régulation de la pression.

La deuxième partie est une enceinte d'essai contenant une lance fixe et un support d'échantillons. L'échantillon est placé devant un système de détection de perforation et des mousses simulant le corps humain. L'ensemble est monté sur un arbre tournant. Pour des raisons pratiques, plutôt que de déplacer la lance comme cela se fait en situation réelle

d'utilisation, c'est l'échantillon qui passe devant la lance avec une vitesse de rotation réglable.

Simulateur du corps humain

L'objectif était de trouver un matériau susceptible de représenter les tissus humains [12], c'est-à-dire la peau et les tissus mous et, parallèlement, de mettre au point un système d'évaluation de l'effet du jet.

La première étape a été de trouver un matériau correspondant à la peau et à la chair. Les résultats de la publication rédigée par le NIOSH [14] indiquent la force nécessaire pour perforer de la peau humaine post-mortem.

L'embout utilisé par le NIOSH représente un clou (cf. Figure 10) :

Caractéristiques

Résultats obtenus par le NIOSH lors des essais de pénétration avec de la peau humaine post-mortem.

| Type de pointe | Force de pénétration (N) |
|----------------|--------------------------|
| A | ~ 80 |
| B | ~ 60 |
| C | ~ 70 |
| D | ~ 65 |
| E | ~ 30 |

Des essais de perforation ont été effectués sur de la poitrine de porc à l'aide d'un banc de traction/compression en utilisant une pointe du type E dont le diamètre est le plus proche des diamètres de jets d'eau utilisés pour le banc d'essai.

Résultats de la comparaison entre la peau humaine et la poitrine de porc :

- publication NIOSH : force de perforation ≈ 30 N sur de la peau humaine,
- essais INRS : force de perforation ≈ 40 N sur de la poitrine de porc.

En conclusion, la poitrine de porc a des caractéristiques de perforation proches de celles de l'homme dans ces conditions d'essais.

La deuxième étape avait pour objectif de trouver un matériau facile d'utilisation dont les caractéristiques mécaniques sont proches de celles de la poitrine de porc lors des essais sur le banc jet d'eau haute pression. Ainsi, après avoir déterminé la pression nécessaire pour perforer la poitrine de porc, plusieurs épaisseurs de latex ont été testées. La feuille de latex était posée sur une épaisseur de 12 mm de plastiline, celle-ci étant déjà utilisée dans les normes balistiques pour simuler le corps humain.

En conclusion, l'épaisseur de latex donnant les résultats les plus proches lors des essais sur le banc de jet d'eau THP est 0,18 mm.

Système de détection de la perforation du matériau de protection

Ce système de détection doit avoir plusieurs qualités :

- techniquement simple,
- faible coût,
- mise en œuvre simple,
- avoir des caractéristiques proches de la peau,
- être insensible à l'eau,
- permettre une analyse de la perforation facile, performante et rapide.

TABLEAU II

Effet de l'épaisseur de latex sur la perforation et comparaison avec la poitrine de porc
Effect of latex thickness on perforation and comparison with pork breast

| Échantillon | Pression de perforation (bars) |
|---|--------------------------------|
| poitrine de porc | 40 |
| latex d'épaisseur 2 mm + 12 mm de plastiline | 80 |
| latex d'épaisseur 1 mm + 12 mm de plastiline | 70 |
| latex d'épaisseur 0,5 mm + 12 mm de plastiline | 50 |
| latex d'épaisseur 0,18 mm + 12 mm de plastiline | 35 |

La couche de latex d'épaisseur 0,18 mm placée entre le matériau de protection et le dispositif de simulation du corps humain, déjà employé en tant que simulateur de la peau humaine, répond parfaitement aux différents critères de choix. L'analyse se fait en plaçant cette feuille de latex devant une lumière et en l'étirant jusqu'à atteindre 2 fois sa longueur initiale. Les perforations apparaissent alors très clairement. L'épaisseur de latex a été vérifiée sur chaque nouvelle feuille et à différents endroits afin de contrôler que le fabricant maîtrise sa fabrication comme annoncé et garantit ainsi la répétitivité des résultats.

Tailles de l'échantillon et du support

La difficulté réside dans la représentativité du comportement mécanique de l'échantillon du matériau de protection, testé sur le banc d'essai, avec un vêtement de protection porté par un opérateur. Suite aux essais comparatifs, la dimension choisie correspond au format A4 pour plusieurs raisons :

- taille suffisante permettant de s'affranchir des effets dues aux conditions des limites de fixation puisque celles-ci sont éloignées de la zone d'impact du jet,
- correspondance avec la surface d'une jambe.

Le système de fixation de l'échantillon sur le support constitue une autre difficulté. Au départ, le matériau à contrôler était maintenu par 2 brides

FIGURE 11

Représentation du support d'échantillon
Representation of sample support

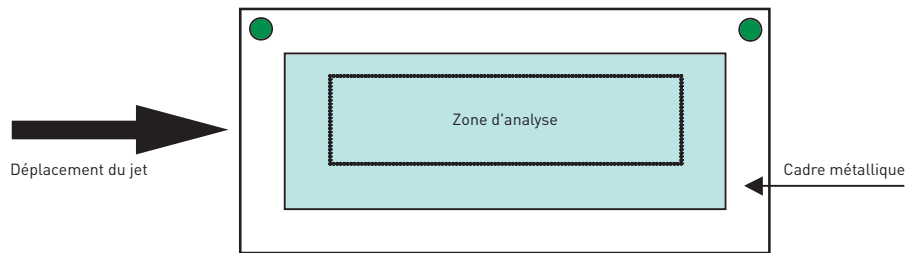


FIGURE 12

Pression en fonction du diamètre de buse
Pressure with respect to nozzle diameter

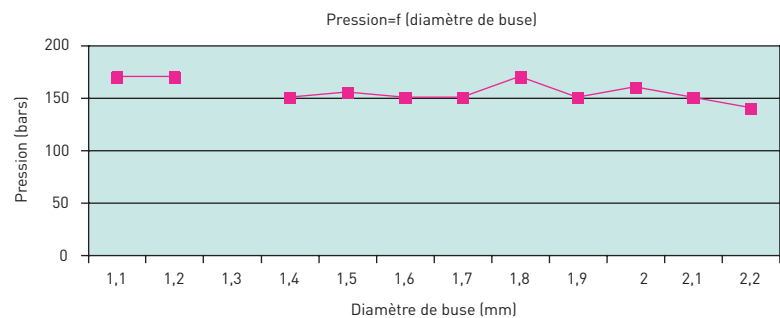


FIGURE 13

Pression de perforation en fonction de la distance buse/échantillon
Perforation pressure with respect to nozzle/sample distance

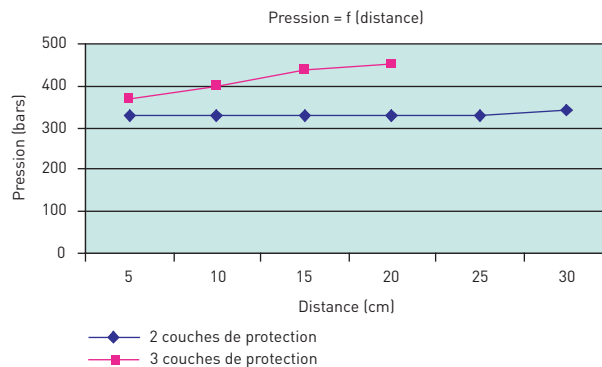
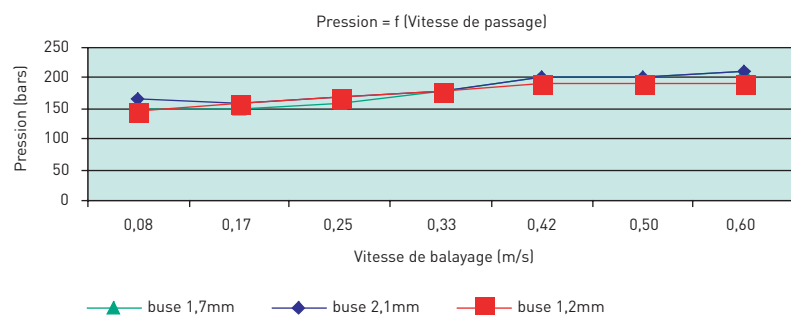


FIGURE 14

Pression de perforation en fonction de la vitesse de passage de l'échantillon devant le jet
Perforation pressure with respect to sample passing speed in front of jet



métalliques mais, après analyse, il semble que ce dispositif peut influencer les résultats par la tension créée lors de la déformation due à l'impact. Un cadre métallique maintenu sur un seul coté par 2 vis montées sur ressort est donc préféré (cf. Figures 11 et 15) afin de garder un peu de liberté dans le tissu comme un vêtement lorsqu'il est porté. Le cadre métallique est donc simplement en appui sur le pourtour pour que le tissu ne se soulève pas lors du passage du jet (cf. Figure 11).

La zone d'analyse a été réduite car il peut apparaître des effets de bord et des perturbations lorsque le jet passe du cadre au tissu en s'insinuant sous le cadre métallique.

Influence et détermination des paramètres d'essais du banc

Les paramètres du jet, lors des situations d'accident sur le terrain, ont été préalablement estimés. L'objectif des tests suivants est de déterminer l'influence de la variation de ces paramètres et d'en déduire les valeurs les plus pertinentes pour les essais.

Les éléments définis précédemment c'est-à-dire le latex d'épaisseur 0,18 mm et les caractéristiques de la mousse placée derrière l'échantillon ont été utilisés pour déterminer les paramètres d'essai du banc. Le principe de l'essai est d'augmenter la pression jusqu'à trouver celle permettant de perforer l'échantillon et de faire varier un des paramètres dont on veut déterminer l'influence.

La Figure 12 montre que la variation du diamètre de buse, dans la gamme explorée, influence faiblement la valeur de pression pour obtenir une perforation. Seule la surface d'impact augmente lorsque le diamètre de buse, donc le diamètre du jet, augmente.

Pour des pressions de perforation inférieures à 350 bars, la Figure 13 montre que l'influence de la distance buse/ matériau de protection est très faible dès lors qu'elle est comprise entre 5 cm et 25 cm. Par contre, pour des pressions supérieures à 350 bars, plus la pression nécessaire pour perforer les couches de protection est élevée, plus l'influence de la distance semble importante.

Les points de la courbe « 3 couches

de protection » à 25 et 30 cm ne sont pas indiqués car la pression nécessaire pour perforer ces 3 couches est supérieure à 450 bars (pression maximale de la pompe INRS avec une buse de diamètre 1,2 mm).

La Figure 14 montre que l'influence de la vitesse de passage de l'échantillon devant la buse sur la pression nécessaire pour perforer est de l'ordre de 20 % si elle est comprise entre 0,08 et 0,6 m/s.

Les Figures 13 et 14 montrent que la pression de perforation des couches de protection varie faiblement. La description physique du jet explique ce phénomène car le support d'échantillon se situe dans la région d'écoulement continu. Dans cette région la pression d'impact et la vitesse d'écoulement diminuent faiblement.

Lors de l'utilisation sur le terrain, on estime une distance buse/cible à environ 10 cm et une vitesse de déplacement de la lance d'environ 0,5 m/s. Ces deux paramètres se situent dans les fourchettes définies lors des essais. De plus, la pression de perforation est peu sensible aux variations de ces deux paramètres dans les gammes de distance et de vitesse d'échantillons étudiés.

Quand à la pression et au diamètre de buse, ils sont liés par la relation suivante donnant la force de réaction :

$$\text{Force de réaction} = \pi/2 \cdot P_o \cdot d^2 \cdot C_d$$

avec :

- P_o pression en Pa,
- d diamètre en m,
- C_d coefficient de décharge de la buse (donnée constructeur).

La force de réaction étant limitée par certaines conditions de travail à 150 N pour les lances tenues à la main sans système de maintien et à 250 N pour celles équipées d'une crosse, les couples pression/buse sont donc choisis en fonction du type de lance et de son utilisation.

En conclusion, les conditions d'essai proposées pour un contrôle de matériel de protection sont :

- vitesse de passage de l'échantillon devant la buse : 0,5 m/s,
- distance buse/échantillon : 10 cm,
- pression : selon la revendication,
- diamètre de buse : selon la revendication.

Remplacement de la plastiline

La plastiline présente l'inconvénient d'avoir un fluage très sensible à la température. Il a donc été nécessaire de trouver un matériau pour la remplacer. Les spécifications des normes balistiques américaines [14] ont les mêmes contraintes, c'est-à-dire la nécessité de reproduire les caractéristiques du corps humain lors des contrôles des gilets pare-balles. Ces normes recommandent l'utilisation de mousses spécifiques. Elles ont été comparées avec la plastiline et donnent des résultats suffisamment proches pour être retenues. Les caractéristiques des mousses sont les suivantes :

- 3 couches de 5 mm, mousse de néoprène SCE45, shore A20-30,
- 1 couche de 35 mm de polyéthylène de mousse à cellules fermées, shore A14, LD45, densité 33 kg/m³,
- 2 couches de 5 mm, caoutchouc shore A45-50.

Résultats de la comparaison :

■ Latex épaisseur 0,18 mm + 12 mm de plastiline :

Pression de perforation ≈ 35 bars

■ Latex épaisseur 0,18 mm + 6 couches de mousses définies :

Pression de perforation ≈ 40 bars

Le simulateur du corps humain se compose donc d'une superposition de 6 couches de mousses avec des caractéristiques définies pour simuler la compression du muscle et d'une feuille de latex d'épaisseur 0,18 mm pour simuler la peau et utilisée en tant que détecteur de perforation.

La Figure 15 présente le détail du montage et la trace en arc de cercle provoquée par l'impact du jet sur un matériau de protection.

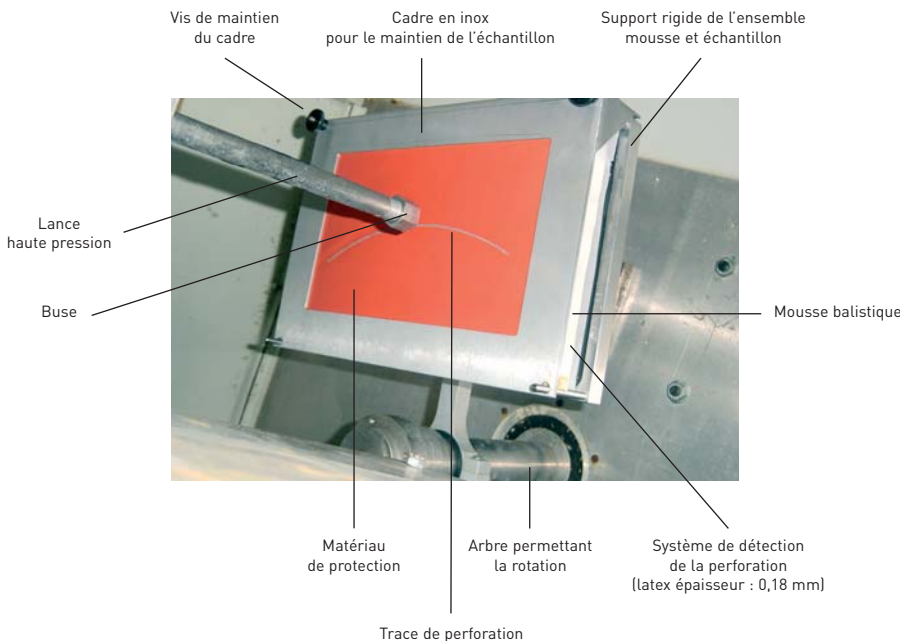
Tests de tenue aux jets d'eau THP de matériaux de protection

L'objectif est de rechercher des concepts de matériaux susceptibles de mieux résister aux jets d'eau THP. Les conditions d'essai utilisent les paramètres définis précédemment.

Généralement, la matière première utilisée dans la composition des fils, c'est-à-dire la fibre ainsi que le processus d'élaboration du textile, est définie en fonction de l'objectif visé. Dans le cadre de l'étude, les matériaux sont classés en fonction des différents procédés de fabrication.

FIGURE 15

Échantillon dans l'enceinte d'essai Sample inside testing enclosure



Matières tricotées

Selon la matière première employée, elles sont très résistantes à la coupure et à la déchirure mais présentent l'inconvénient de laisser soit le jet d'eau passer au travers des mailles, si celles-ci sont trop grosses, soit de s'écarter si les mailles sont serrées.

Matières tissées

Selon la matière première employée, elles ont des caractéristiques mécaniques élevées pouvant être intéressantes mais, comme pour les matières tricotées, même si la contexture est élevée, les fils s'écarteront suffisamment pour laisser passer le jet.

Matières non-tissées

Ce sont des textiles obtenus par le liage mécanique et/ou chimique et/ou thermique de fibres textiles disposées en nappe, en excluant le tissage et le tricotage.

■ **Matières non tissées molletonnées (type papier buvard) :**

Le molleton est obtenu par un liage mécanique. Il a une résistance à la coupure intéressante, mais une résistance faible à l'arrachement. Par contre, il ne présente pas, comme pour les matières précédentes, l'inconvénient d'être constitué de fils qui peuvent s'écarter. Le résultat n'est cependant pas concluant car les fibres s'arrachent les unes par

rapport aux autres pour rapidement présenter un trou laissant passer le jet.

■ **Matières non tissées liées thermiquement :**

Ce type de textile est obtenu par thermofixage : une surface de fibres est positionnée dans un sens, une autre dans l'autre sens, pour être liées par compression et chauffage. Cette couche a une résistance mécanique à la coupure et à la déchirure élevée selon les fibres utilisées, mais la résistance à la perforation au jet THP est encore trop faible. Pour espérer obtenir un résultat satisfaisant, il faudrait multiplier les couches, mais cela diminue sensiblement la souplesse de l'ensemble. De plus, son coût étant généralement très élevé, la multiplication des couches entraîne rapidement un prix prohibitif.

Matières enduites

L'enduction est l'opération de dépôt d'une matière spécifique sur la surface d'une étoffe (matières tricotées, tissées ou non tissées) afin de lui conférer des caractéristiques particulières. Elles donnent des résultats très intéressants pour des tissus de type polyester enduit ayant à la base des caractéristiques mécaniques et une résistance à la coupure plutôt faible. Ces résultats concluants proviennent certainement de l'enduction des 2 faces des tissus qui donne à l'ensemble un maintien des fils très

important évitant ainsi l'apparition trop rapide d'un trou. Ce mécanisme permet ainsi de freiner le jet et de le casser sur la première couche, d'autant plus que le nombre de couches est important. L'enduction agit en amortissant l'action du jet.

Les tissus enduits composés de fibres reconnues comme ayant des caractéristiques mécaniques élevées et donc solides type Kevlar® donnent des résultats encore légèrement meilleurs. Par contre, leur coût reste très élevé.

COMPARATIFS AVEC LES PROCÉDÉS ALTERNATIFS

La technologie du nettoyage/décapage aux jets d'eau THP est en pleine expansion. Pour comprendre l'intérêt porté par les entreprises à cette technologie, et compléter cette étude, un comparatif avec les procédés alternatifs est nécessaire.

Intérêts et inconvénients du jet d'eau THP

Les intérêts du nettoyage/décapage au jet d'eau THP par rapport aux procédés alternatifs (décapage chimique, thermique, laser, projection de particules, meulage manuel ou mécanique, etc.) sont :

- la polyvalence d'élimination de tous les matériaux sur pratiquement tous types de substrats plutôt durs,
- la vitesse de décapage,
- la capacité à décapier des pièces excessivement grandes,
- la possibilité de répondre aux exigences environnementales de plus en plus rigoureuses.

Évidemment, malgré ces nombreux avantages, il existe certains inconvénients comme :

- la corrosion due à l'eau,
- l'impossibilité de décapier des matériaux friables,
- les risques importants pour les opérateurs,
- la pénibilité,
- la difficulté à décapier des endroits difficiles d'accès par le jet d'eau.

Dans tous les cas, quel que soit le type de nettoyage/décapage/démolition, ce sont les inconvénients des différentes méthodes de préparations des surfaces (production de poussière, de bruit ou de vibrations, risques de corrosion, risques

pour l'opérateur, vitesse ou rendement, difficultés du traitement des effluents, coût etc.) qui permettront de juger de l'opportunité d'appliquer telle ou telle technique à un type de matériau en fonction du substrat, du niveau de dégradation désiré et du niveau de finition nécessaire.

Risques de certains procédés alternatifs

Un comparatif des risques pour l'opérateur en fonction du type de décapage employé est présenté *Tableau III*.

Il faut remarquer que de nombreux procédés de décapage nécessitent l'utilisation du jet d'eau haute pression pour finaliser l'opération, par exemple après un décapage chimique ou thermique, le jet HP permet un rinçage - nettoyage de la surface. De même pour le décapage par projectiles, le jet d'eau haute pression intervient souvent dans la phase finale pour débarrasser le substrat de tous les résidus de particules et donc nettoyer la surface décapée avant d'être repeinte. Même si, pour ce type d'opérations, les pressions utilisées sont plus faibles, elles restent néanmoins dangereuses. Les projections de produits chimiques obligent l'opérateur à se protéger et le jet d'eau HP reste une source de danger dont il faut également se protéger. De plus, les effluents produits sont souvent beaucoup plus compliqués à traiter.

HYDRODÉMOLITION

Un autre domaine également en pleine expansion utilisant les jets d'eau THP dans des conditions proches de celles du décapage est celui de l'hydrodémolition dans le cadre de la rénovation. L'intérêt principal de cette méthode est l'élimination de béton sur un linteau, sans altérer la structure par des vibrations parasites comme le marteau piqueur pourrait en produire, en laissant intact les fers à béton. Mais cette technique n'est pas couverte par cette étude car les pressions sont souvent très supérieures à celles utilisées dans le nettoyage/décapage.

Les avantages de l'hydrodémolition sont :

- l'absence de vibrations dans la structure réduisant le niveau sonore dans l'édifice,
- l'absence de poussière,

TABLEAU III

Risques en fonction de la méthode de nettoyage Risks in relation to cleaning method

| Type de décapage | Danger pour l'opérateur |
|------------------|--|
| Manuel | - trouble musculo-squelettique (TMS), - devient vite très fatigant pour l'opérateur. |
| Thermique | - brûlures, - émanation de gaz dangereux en fonction du revêtement, - bruit. |
| Chimique | - émanation de gaz souvent très toxiques, - contact avec la peau. |
| Abrasif | - production de poussières importantes mêlant particules d'abrasifs et de revêtement pouvant être très toxiques, - exposition au jet d'abrasifs, - bruit. |
| Laser | - exposition au faisceau laser, - émanation de gaz dangereux en fonction du revêtement, - bruit. |
| Jet d'eau | - projection de particules de revêtement qui peuvent être toxiques, - projection de particules qui peuvent être dangereuses lors du choc avec une partie du corps, - exposition au jet d'eau HP, - bruit. |

■ la limitation du bruit à la zone de travail (pas de résonance dans la structure comme lors du marteau piqueur),

■ l'armature non endommagée, ce qui peut arriver lorsque l'on utilise un scarificateur ou un outil pour tailler la pierre,

■ la possibilité d'enlever le béton dégradé et laisser les parties saines intactes,

■ l'amélioration de la rapidité pour éliminer le béton dégradé.

■ empilement des 6 couches de mousses pour simuler la chair.

Il apparaît indispensable de créer des classes de protections, car concevoir un vêtement protégeant contre les dangers provenant de tous les types de jets d'eau THP est impossible en raison des contraintes de conception et de l'augmentation des coûts que cela entraînerait. De plus, porter des vêtements qui surprotégeraient entraînerait certainement des problèmes d'ergonomie alors que ce paramètre est important pour les opérateurs qui travaillent déjà dans des conditions souvent très pénibles.

Ce classement se fera en tenant compte du couple Force de réaction/Pression comme le projet de *Tableau IV*

DISCUSSION ET CONCLUSION

ÉLABORATION D'UNE MÉTHODE D'ESSAI POUR LE CONTRÔLE DES VÊTEMENTS DE PROTECTION CONTRE LES JETS D'EAU HP

Cette étude a permis de mettre au point une méthode d'essai pour évaluer les EPI protégeant contre les jets THP. Les principaux paramètres de la méthode sont donc fixés :

- détection du percement de la protection en examinant la feuille de latex d'épaisseur 0,18 mm,
- vitesse de passage à 0,5 m/s,
- distance buse/matériel de protection à 10 cm,

TABLEAU IV

Conditions d'essais du matériel testé Testing conditions for material tested

| Force de réaction | Pression (bar) | | | |
|-------------------|----------------|------|------|------|
| | 500 | 1000 | 1500 | 2000 |
| 50 N | X | | X | |
| 100 N | X | | | |
| 150 N | | | | |
| 200 N | | | | |
| 250 N | | | | |

le montre. Le marquage correspondant devra être significatif c'est-à-dire indiquer la valeur de pression et la force de réaction. Il faut absolument faire comprendre aux utilisateurs que la pression n'est pas le seul paramètre à prendre en compte pour définir une protection, que la force de réaction ou le débit sont au moins aussi importants.

MATÉRIAUX SUSCEPTIBLES D'ÊTRE EMPLOYÉS DANS LA FABRICATION DES VÊTEMENTS DE PROTECTION

Les conclusions ci-dessous sont valables uniquement pour des pressions inférieures à 500 bars et des diamètres de buse compris entre 0,8 mm et 2 mm.

Les tissus tricotés à grosses mailles, ou plus généralement les tissus permettant aux fils de s'écarter facilement les uns des autres, ne conviennent pas pour la fabrication de vêtement de protection, car lors de l'impact du jet d'eau, des ouvertures importantes sont créées et n'offrent donc plus aucune barrière.

Les différents tests ont montré que certains tissus enduits sont susceptibles de résister aux jets d'eau THP. L'intérêt de ce type de matériau est de maintenir les mailles les unes par rapport aux autres lors de l'impact du jet. Même si ce matériau est intéressant, les tests ont également montré qu'une seule couche est souvent insuffisante. L'utilisation de plusieurs couches (multi-couches) apporte une première solution. L'objectif n'est pas de stopper complètement le jet dès la première couche, mais de le fractionner suffisamment pour qu'il perde de son énergie et devienne inoffensif. Il serait intéressant de déterminer le nombre de couches d'un type de matériau défini en fonction de la pression à laquelle il résiste. Même si le nombre est limité par les contraintes de confection et d'ergonomie, cette solution peut être intéressante pour comparer les matériaux et leurs comportements.

Une deuxième solution consiste à empiler différents types de matériaux, selon l'assemblage le plus adapté ; par exemple, les matériaux composés de fibres très résistantes dans les premières couches et ensuite de tissus plus imperméables dans les dernières.

L'objectif de toutes ces propositions est toujours de diminuer l'épaisseur et

le poids de l'EPI pour améliorer son ergonomie.

Il sera donc indispensable de valider ces conclusions avec des pressions plus élevées que celles définies lors de cette étude.

En conclusion, le type de matériau le plus prometteur pour la fabrication de vêtements de protection contre les jets HP et THP est le tissu enduit composé d'une trame de fil très solide type aramide mais pour des pressions maximales de 500 bars avec un débit inférieur à 20 l/min.

La recherche sur les tissus techniques étant en constant développement, il est nécessaire d'effectuer une veille technologique soutenue pour répondre à la demande des utilisateurs et continuer à assurer leur sécurité.

Un autre élément à prendre en compte est la limite d'un EPI conçu avec ce type de matériau. Il ne permet qu'un seul passage du jet et il sera donc indispensable d'indiquer dans la notice d'utilisation qu'il est impératif de vérifier l'EPI avant chaque utilisation et de le changer si celui-ci présente des marques pouvant diminuer ses propriétés.

LES ÉVOLUTIONS

Actuellement, pour une force de réaction constante, la tendance va vers une augmentation des pressions grâce à une diminution des diamètres de buses, encore amplifiée par l'utilisation des jets rotatifs.

Ces dernières années, des évolutions importantes sont apparues. La pression atteint maintenant des valeurs comprises entre 700 bars et 1 200 bars pour le nettoyage et jusqu'à environ 3 000 bars pour le décapage. Cette tendance s'explique par la diminution des diamètres de buse et l'utilisation des têtes rotatives équipées de 1 à 6 buses permettant de conserver une force de réaction inférieure à 250 N.

Les intérêts pour les entreprises d'augmenter les pressions sont :

- l'efficacité : généralement, plus les pressions sont élevées plus l'opération à effectuer est rapide,
- d'ordre environnemental : les contraintes dans ce domaine sont de plus en plus importantes et en augmen-

tant les pressions pour une même force de recul, la consommation d'eau et donc le volume des effluents à traiter diminuent.

Les risques engendrés par ces nouvelles conditions doivent être estimés et il convient de s'interroger sur la validité des conclusions et de la présente étude pour ces nouveaux matériels.

Reçu le : 22/08/2005

Accepté le : 12/04/2006

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MERLE C. - Découpage des produits alimentaires par jet d'eau à très haute pression. DEA 1991, p. 1 à 32.
- [2] WERLE R. - Equipements à jets d'eau sous haute et très haute pression, ED 784, INRS, 1997, 88 pages.
- [3] LEU M.C., MENG P. & GESKIN E.S., TISMENESKIY L. - Mathematical Modeling and Experimental Verification of Stationary Waterjets Cleaning Process, Transactions of the ASME-Journal of Manufacturing Science and Engineering, Août 1988, Vol. 120, pp. 571-579.
- [4] LOUIS H., SCHIKORR W. - Fundamental Aspects in Cleaning with High Speed Waterjets, Proceeding of the 6th International Conference on Jet Cutting Technology, Guilford, 1982, pp. 217-228.
- [5] MENG P., GESKIN E.S., LEU M.C., LI F., TISMENESKIY L. - An Analytical and Experimental Study of Cleaning with moving Waterjets, Transactions of the ASME-Journal of Manufacturing Science and Engineering, August 1988, Vol. 120, pp. 580-589.
- [6] MENG P., LEU M.C., GESKIN E.S. & TISMENESKIY L. - Cleaning with High-Pressure Directed Waterjets, Proceedings of Japan-USA Symposium on Flexible Automatin, Boston, MA, July, 1996.
- [7] BOWDEN F.P., FIELD J.E. - The Brittle Fracture of solids by Liquid Impact, by Solid Impact an by Shock, Proc. R; Lond., Ser. A282, 1964, pp. 331-352.
- [8] MABROUCKI T. - Exploration Expérimentale et Modélisation Numérique des Impacts Fluidiques : Contribution à l'Étude du Décapage par Jet d'Eau Pure HP Thèse de doctorat présenté à l'ENSAM, 2000, 182 pages.
- [9] YANAIDA K., OHASHI A. - Flow characteristics of waters jets in air 4th Int. Symp. on jet cutting technology, BHRA Fluid Engng., Cranfield, England, pp. 39-54.
- [10] HASHISH M., DU PLESSIS M.P. - Theoretical and experimental investigation of continous jet penetration of solids, Transaction of ASME, Engineering for industry, vol ; 100, 1978, pp. 88 à 84.
- [11] REHBINDER G. - Erosion resistance of rock, 4th Int. Symp. On jet cutting techn., BHR Fluid Engineering, Cranfield, pp. E1 - 1/E1-11.
- [12] MANSCHOT J - The mechanical properties of human skin in vivo Thèse de doctorat présenté à l'université catholique de Nijmegen, 1985, 133 pages.
- [13] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) - Publication, The development of criteria for Firefighter's Gloves : Vol. II : Glove Criteria and Test Method (1976), pp. 16-23.
- [14] National Institut of Justice (NIJ) - Norme, Stab Resistance of Personal Body Armor, NIJ Standart - 0115.00.