

ANNEXE D

Évaluation analytique des forces impliquées dans le fonctionnement d'une scie à béton

Rapport présenté à

Madame Isabelle Émond, ing.

Inspectrice à la Direction régionale de Québec de la
Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST)

par

Jean Ruel, Ph.D., ing.

Département de génie mécanique, Université Laval

14 décembre 2006

Évaluation analytique des forces impliquées dans le fonctionnement d'une scie à béton

Jean Ruel, Ph.D., ing.

1 Introduction

Ce rapport fait suite à une requête de Madame Isabelle Émond, ing., inspectrice de la direction régionale de Québec de la CSST, concernant l'évaluation des forces impliquées dans l'utilisation d'une scie à béton. La motivation de cette étude est le fait que plusieurs accidents se sont produits récemment au Québec avec ce type d'équipement. Suite à ces accidents, des recherches effectuées par Madame Émond lui ont permis de rassembler plusieurs références à des accidents similaires suggérant que certaines des utilisations très variées de cet outil présentent un danger significatif pour l'utilisateur.

Les principes généraux qui sont énoncés dans ce rapport sont applicables à l'ensemble des modèles de scies à béton correspondant à la description présentée en préambule. Cependant, à la demande de la CSST, les calculs ont été effectués en utilisant les données techniques de la scie STIHL TS 400.

Différentes situations d'utilisation seront analysées. Certaines hypothèses seront formulées pour définir de façon adéquate le contexte physique et la portée des résultats. L'interprétation des résultats devra tenir compte de ces hypothèses. Le but de la présente étude étant d'obtenir une évaluation quantitative du niveau de danger associée à l'utilisation de l'outil, et puisque son utilisation est largement répandue et jugée acceptable, il sera présumé au départ que l'outil est sécuritaire. Ceci implique que dans les calculs, lorsqu'un paramètre peut varier à l'intérieur d'un certain intervalle, la valeur la plus conservatrice sera utilisée, c'est-à-dire celle qui sera le plus favorable à l'outil. Ainsi, si en conclusion certaines situations sont jugées dangereuses, il sera opportun de conclure dans ce sens parce que nous aurons été prudents à toutes les étapes pour assurer la présomption d'acceptabilité de l'outil et des méthodes de travail.

2 Description générique de l'équipement étudié

La figure 1 illustre l'équipement étudié. Il s'agit d'une scie à béton comportant un bâti muni de deux poignées et soutenant un moteur à essence. Un bras d'extension supporte une lame rotative, entraînée par le moteur et tournant à haute vitesse.

Dans ce rapport, le terme lame sera utilisé pour désigner la partie tournante seulement, tandis que le terme scie sera utilisé pour désigner l'équipement complet, incluant la lame.

Les caractéristiques et les symboles qui seront utilisées dans les calculs sont¹ :

Diamètre de la lame	$D = 0.356 \text{ m (14")}$
Masse de la lame	$m = 2 \text{ kg}$
Masse totale de la scie ²	$M = 12.5 \text{ kg}$
Vitesse de rotation de la lame	$\omega = 4800 \text{ rpm} = 80 \text{ tour/sec} = 502 \text{ rad/sec}$
Puissance du moteur	$P_{\text{mot}} = 3200 \text{ W}$

3 Description des conditions d'opération normales et des situations occasionnelles problématiques

L'utilisation normale de la scie consiste à la tenir à deux mains, l'une sur la poignée arrière (la main droite) permettant l'action de l'interrupteur d'accélération de la lame, et l'autre (la main gauche) sur la poignée centrale.

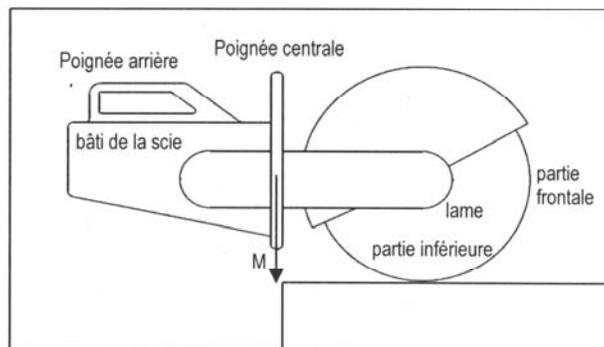


Figure 1

¹ Ces données ont été fournies par Madame Isabelle Émond le 27 octobre 2006.

² Incluant la lame et l'essence.

La répartition de la masse est telle que la scie peut être soulevée par la poignée centrale et qu'elle se tient alors en équilibre statique, c'est-à-dire que le centre de masse de l'équipement est situé dans le plan de la poignée centrale.

Lorsque le moteur à essence est en marche et que la scie est maintenue bien en main par l'utilisateur, l'interrupteur d'accélération peut être actionné pour mettre la lame en mouvement. Un guide d'utilisation de la compagnie STIHL intitulé « Travailler en sécurité avec la découpeuse »³ préconise d'effectuer la coupe avec la partie inférieure de la lame. Cependant, le garde qui protège l'utilisateur de la partie supérieure de la lame peut être rétracté pour permettre d'effectuer une coupe avec la partie frontale de la lame. Cette situation est plus dangereuse.

Une mise en garde sérieuse est formulée dans le guide d'utilisation intitulé « Travailler en sécurité avec la découpeuse »⁴. On y mentionne que « si le contact a lieu avec la partie frontale du disque, le disque aura tendance à remonter sur l'objet à découper et à sortir de la coupe (cabrage) ». On poursuit « si la partie avant du disque se coince, tout spécialement dans le quart supérieur, le disque peut être brusquement projeté vers le haut et vers l'arrière, en décrivant un mouvement de rotation très violent en direction de l'utilisateur », et on conclut cet avertissement par les mots « danger de mort ».

Une analyse des forces impliquées dans le fonctionnement « normal » de la scie (c'est-à-dire sans coincement de la lame) sera d'abord présentée pour des situations de coupe avec la partie inférieure du disque, puis avec la partie frontale. Ensuite, la situation de coincement sera étudiée dans le but d'évaluer les forces développées par la scie et les mouvements possibles de projection de l'outil.

4 Analyse

Analyse des efforts en situation normale

Dans cette section, les efforts produits par l'utilisation de la scie en situation normale de travail seront étudiés. Une situation normale est une opération de coupe sans problème de coincement de la lame.

Situation normale 1 : coupe avec la partie inférieure de la lame, représentée à la figure 2.

³ Voir la référence [4].

⁴ Voir la référence [4] à la page 8.

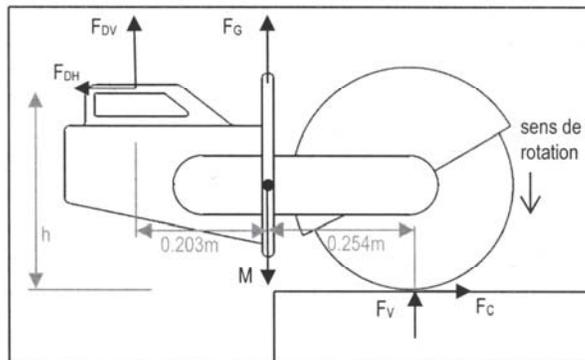


Figure 2

Sur la figure 2, les forces impliquées dans le procédé sont superposées au schéma de la scie. La force exercée par la main droite sur la poignée arrière a été divisée en une composante verticale F_{DV} et une composante horizontale F_{DH} . Il est important de mentionner qu'une partie de la force horizontale F_{DH} pourrait être transférée à la main gauche, mais ceci ne changerait pas l'analyse. De plus, dans certaines situations qui seront présentées dans ce qui suit, les forces F_G et F_V peuvent être nulles.

Estimation de la force de coupe F_C

Lors de la coupe, la puissance du moteur (3200 W) est transmise à la lame avec un rendement de 95 %⁵. La lame reçoit une puissance $P_{\text{lame}} = 0.95 P_{\text{mot}} = 3040 \text{ W}$.

Cette puissance peut être exprimée en fonction du couple C imposé à la lame (exprimé en N.m) et de la vitesse de rotation de la lame $\omega = 4800 \text{ rpm} = 502 \text{ rad/sec}$ par l'équation :

$$P_{\text{lame}} = C \times \omega$$

Le couple peut être calculé :

$$C = P_{\text{lame}} / \omega = 3040 \text{ W} / 502 \text{ rad/sec} = 6.06 \text{ N.m}$$

Le couple C sert à maintenir la lame en mouvement, c'est-à-dire à vaincre la force de coupe F_C exercée à la périphérie de la lame. Le couple peut être exprimé en fonction de la force F_C et du rayon r de la lame ($r = 0.178 \text{ m}$) par l'équation

$$C = F_C \times r$$

La force de coupe peut être calculée :

⁵ La référence [2] propose un rendement de 95 à 97% pour un entraînement par courroies. Selon le principe de présomption de sécurité exposé en introduction, la valeur de 95% sera utilisée.

$$F_C = C / r = 6.06 \text{ N.m} / 0.178 \text{ m} = 34.0 \text{ N} = 3.47 \text{ kg}$$

Premier cas étudié : l'opérateur tient la scie avec ses deux mains, et effectue la coupe sans exercer de pression vers le bas sur la scie ($F_V = 0$).

La première situation analysée est celle où l'opérateur tient la scie à deux mains et n'exerce aucune force verticale sur la lame ($F_V = 0$).

L'équilibre des forces horizontales sur la scie implique la présence d'une force F_{DH} exercée de la main droite égale et opposée à la force de coupe F_C :

$$F_{DH} = F_C = 34 \text{ N} = 3.47 \text{ kg}$$

La hauteur h entre le point d'application de la force de coupe F_C et la prise de la main droite sur la poignée arrière dépend de plusieurs paramètres variables, tels que la profondeur d'enfoncement de la lame dans la coupe et l'angle de l'axe horizontal de la scie par rapport au sol. Une valeur moyenne de 0.356 m (14") sera utilisée pour les calculs. L'équilibre des moments par rapport au centre de masse (somme des moments = 0) implique que

$$F_{DH} \times (0.178 \text{ m}) + F_C \times (0.178 \text{ m}) = F_{DV} \times (0.203 \text{ m})$$

$$F_{DV} = 2 \times 34 \text{ N} \times 0.178 \text{ m} / 0.203 \text{ m} = 59.6 \text{ N} = 6.1 \text{ kg}$$

L'équilibre des forces verticales sur la scie implique que

$$F_{DV} + F_G = M = 12.5 \text{ kg} \text{ donc } F_G = 6.4 \text{ kg}$$

Ainsi, la masse de la scie est répartie assez également sur les deux mains, et la charge totale correspond à la masse de la scie soit 12.5 kg. Il faut également que l'opérateur exerce une force de retenue vers l'arrière de 3.47 kg pour empêcher la scie d'avancer.

Ces forces sont faibles et peuvent être retenues assez facilement par l'opérateur. Puisqu'elle ne nécessite pas de grand effort, cette situation peut conduire à une vigilance réduite de l'opérateur pouvant augmenter son temps de réaction en cas de problème.

Deuxième cas étudié : l'opérateur tient la scie avec ses deux mains, mais n'exerce plus de force vers le haut avec sa main gauche ($F_G = 0$), et effectue la coupe en laissant porter la scie sur la lame.

Selon toute vraisemblance, l'opérateur peut avoir tendance à forcer moins de la main gauche et à laisser porter la scie sur la lame tout en la retenant avec la main droite.

Ici encore, l'équilibre des forces horizontales sur la scie implique la présence d'une force F_{DH} exercée de la main droite égale et opposée à la force de coupe F_C :

$$F_{DH} = F_C = 34 \text{ N} = 3.47 \text{ kg}$$

Considérant l'équilibre des moments par rapport à l'endroit où la main droite maintient la scie par la poignée arrière (somme des moments = 0) :

$$12.5 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.203 \text{ m} = F_C \times (0.356 \text{ m}) + F_V \times (0.457 \text{ m})$$

$$F_V = 28 \text{ N} = 2.85 \text{ kg}$$

L'équilibre des forces verticales sur la scie implique que

$$F_{DV} + F_V = M = 12.5 \text{ kg} \text{ donc } F_{DV} = 9.65 \text{ kg}$$

Ainsi, seule la main droite exerce des forces sur la scie, soit une force de retenue vers l'arrière de 3.47 kg et une force verticale de 9.65 kg.

Ici encore ces forces sont faibles et peuvent être retenues assez facilement par l'opérateur, ce qui peut conduire à une vigilance réduite et augmenter le temps de réaction en cas de problème.

On peut finalement remarquer que la force réactive F_V de 2.85 kg, qui correspond à la force verticale naturelle avec laquelle la masse de la scie pousse la lame dans la coupe si l'opérateur laisse porter la scie, n'est pas très élevée. Il est fort probable que l'opérateur puisse appliquer une force vers le bas avec sa main gauche pour augmenter la réaction F_V et accélérer l'enfoncement de la lame dans la coupe.

Situation normale 2 : coupe occasionnelle avec la partie frontale de la lame, représentée à la figure 3.

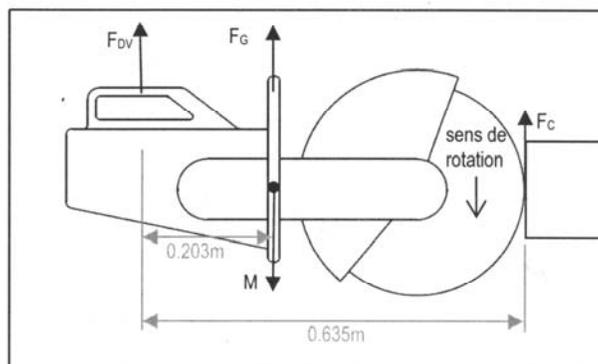


Figure 3

Au départ, avant d'engager la lame dans le matériau à couper, l'opérateur s'approche en soutenant la scie avec ses deux mains mais principalement avec sa main gauche puisqu'elle est

située au-dessus du centre de masse de la scie⁶, de telle sorte que la masse M produit une force F_G vers le haut.

Lorsque la lame de la scie s'engage dans le matériau, une force de coupe est générée vers le haut sur la partie frontale de la lame, selon

$$F_C = C / r = 6.06 \text{ N.m} / 0.178 \text{ m} = 34.0 \text{ N} = 3.47 \text{ kg}$$

Cette force déséquilibre le système et doit être compensée. L'opérateur doit alors continuer de soutenir la scie avec ses deux mains, mais il doit réduire le soutien de la main gauche et effectuer un transfert de masse vers la main droite à l'arrière. À l'équilibre, la somme des moments par rapport au centre de masse est nulle :

$$F_{DV} \times 0.203 \text{ m} = F_C \times 0.432 \text{ m}$$

La force exercée par la main droite est donc :

$$F_{DV} = F_C \times (0.432 \text{ m} / 0.203 \text{ m}) = 34 \text{ N} \times (0.432 \text{ m} / 0.203 \text{ m}) = 72 \text{ N} = 7.38 \text{ kg}$$

L'équilibre des forces verticales sur la scie implique que

$$F_{DV} + F_G + F_C = M = 12.5 \text{ kg} \text{ donc } F_G = 1.65 \text{ kg}$$

Ainsi, la masse de la scie est répartie principalement sur la main droite (7.38 kg) tandis que la main gauche force peu (1.65 kg).

Ces forces sont très faibles, ce qui peut conduire à une vigilance réduite et augmenter le temps de réaction en cas de problème.

Analyse des efforts lorsqu'il y a coincement de la lame

Dans cette section, les efforts produits par le coincement et l'arrêt instantané de la lame seront étudiés pour les deux situations de coupe, soit la coupe normale avec la partie inférieure de la lame et la coupe occasionnelle avec la partie frontale de la lame.

Les phénomènes physiques impliqués sont complexes mais ils peuvent être traités par la méthode des énergies, en formulant certaines hypothèses.

Le coincement de la lame se produit lorsque l'un ou les deux blocs du matériau coupé situés de part et d'autre de la lame se déplacent vers celle-ci et la bloquent, ou encore lorsque l'alignement de la lame dans la coupe change brusquement.

Lors du coincement, la lame est freinée et s'arrête extrêmement rapidement. Pendant ce freinage, une partie de son énergie cinétique de rotation est dissipée en chaleur dans le béton et dans le

⁶ D'après les données fournies par Madame Isabelle Émond le 27 octobre 2006.

matériau de la lame elle-même, mais une grande partie de son énergie initiale peut être transférée à la scie, qui est alors mise en mouvement et projetée.

Immédiatement avant le coincement, l'énergie cinétique de rotation E de la lame est ⁷ :

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2$$

où $\omega = 502$ rad/sec est la vitesse de rotation de la lame et J est son moment d'inertie polaire par rapport à l'axe de rotation.

Pour un disque de rayon r et de masse m, le moment d'inertie polaire par rapport à l'axe de rotation s'exprime par ⁸

$$J = \frac{1}{2} m r^2 = \frac{1}{2} (2 \text{ kg}) (0.178 \text{ m})^2 = 0.0317 \text{ kg.m}^2$$

L'énergie cinétique de rotation E de la lame correspondante est

$$E = \frac{1}{2} (0.0317 \text{ kg.m}^2) (502 \text{ rad/sec})^2 = 3994 \text{ J}$$

Cette quantité d'énergie est considérable. Lors d'une situation d'urgence, cette énergie est dissipée et/ou transférée en un très court intervalle de temps et peut produire de grandes forces. Simplement à titre d'indication, cette énergie correspond à celle d'un objet de 10 kg projeté à une vitesse de 100 km/h.

Les hypothèses suivantes permettront l'analyse :

- la durée de l'impact de décélération de la lame dû au coincement est très court. Étant donné que cette durée dépend de plusieurs conditions situationnelles extrêmement variables, des calculs seront effectués pour différentes valeurs de temps d'impact. Cependant, je juge que la majorité des situations de coincement risquent de se produire en un temps d'impact ne dépassant pas 0.2 seconde, et que l'utilisation de cette valeur comme cas limite respecte la présomption de sécurité et d'acceptabilité de l'outil formulée en introduction;
- pendant l'impact, la lame est freinée mais continue de couper jusqu'à son immobilisation et une partie de son énergie cinétique est perdue dans cette coupe;
- le couple de freinage attribuable au coincement crée un couple réactif qui projette la scie;

Le couple requis pour freiner un objet en rotation s'exprime en fonction du moment d'inertie polaire par rapport à l'axe de rotation J et du taux de décélération angulaire $d\omega / dt$ par l'équation ⁹

$$C = J d\omega / dt$$

La différentielle de vitesse lors de l'arrêt de la lame est de $d\omega = 502$ rad/sec, et le taux de décélération dépend du temps de l'impact. Plus l'impact est rapide, plus grandes sont les forces

⁷ Voir la référence [1] à la page 417.

⁸ Voir la référence [1] à la page 630.

⁹ Voir la référence [1] à la page 389.

réactives et plus grand est le couple développé. Il a été mentionné dans la formulation des hypothèses qu'un temps d'impact de 0.2 seconde constitue une limite raisonnable, en ce sens que la majorité des situations de coincement se produisent en un temps ne dépassant pas 0.2 seconde. Dans ce qui suit, l'importance des forces réactives sera discutée pour un temps d'impact de 0.2 seconde, en gardant à l'esprit que des temps d'impact plus rapides risquent également de se produire et de générer des forces encore plus grandes. Rappelons que les résultats obtenus pour le temps d'impact de 0.2 seconde constituent la valeur limite respectant la présomption de sécurité et d'acceptabilité de l'outil. Mentionnons aussi que dans tous les tableaux de résultats, les données seront aussi calculées pour un temps d'impact de 0.5 seconde, à titre de référence comparative.

Le tableau 1 présente la valeur du couple requis pour freiner la lame de la scie en fonction du temps d'impact.

Tableau 1

Temps d'impact (sec)	Couple (N.m)
0.05	318.3
0.10	159.1
0.15	106.1
0.20	79.6
0.50	31.8

Les deux situations de coupe traitées précédemment, c'est-à-dire la coupe normale avec la partie inférieure de la lame et la coupe avec la partie frontale seront maintenant analysées en fonction de ces données.

Situation 3 : coincement lors d'une coupe avec la partie inférieure de la lame

Référant à la figure 2, on peut observer que si la partie inférieure de la lame coince dans le plan de coupe et s'arrête sous l'effet du couple produit par l'augmentation soudaine de la force de coupe F_C (coincement), une réaction équivalente sera transférée au bâti de la scie par son moyeu et projettera la scie vers l'avant. Le tableau 2 présente la valeur de la force réactive de projection vers l'avant en fonction du temps d'impact.

Tableau 2

Temps d'impact (sec)	Force réactive (kg)
0.05	182.3
0.10	91.1
0.15	60.8
0.20	45.6
0.50	18.2

On peut y noter que les forces réactives sont importantes : dans le cas du temps d'impact de 0.2 seconde, la force réactive est de 45.6 kg. Rappelant que la force d'appel vers l'avant est

normalement de l'ordre de 3.47 kg, un passage soudain à 45.6 kg ou même plus peut surprendre l'opérateur qui risque d'échapper la scie.

Dans cette éventualité, la scie se mettra en mouvement vers l'avant. Utilisant le principe de conservation de l'énergie, il est possible d'évaluer la vitesse de projection de la scie vers l'avant.

Il faut d'abord évaluer l'énergie restituée après l'impact en calculant l'énergie absorbée par l'effet de coupe pendant l'impact et en la retranchant de l'énergie initiale de la lame (3994 J).

L'énergie absorbée par l'effet de coupe pendant l'impact est évaluée en multipliant la puissance de coupe de 3040 J/s par le temps d'impact.

Le tableau 3 présente l'énergie restituée en fonction du temps d'impact.

Tableau 3

Temps d'impact (sec)	Énergie dissipée (J)	Énergie restituée (J)
0.05	152	3842
0.10	304	3690
0.15	456	3538
0.20	608	3386
0.50	1520	2474

L'énergie restituée E_{res} se retrouvera sous forme de vitesse de projection avant de la scie (notée V), ainsi que de rotation résiduelle (ω_{res}) de la lame. La rotation résiduelle de la lame est attribuable au fait qu'elle sera probablement remise en rotation en sortant du coincement, bien qu'à une vitesse beaucoup plus faible que sa vitesse initiale. Même si cette vitesse est faible, elle peut constituer un danger pour l'opérateur si celui-ci est touché par la lame.

L'énergie restituée E_{res} exprimée en fonction des paramètres déjà établis est :

$$E_{res} = \frac{1}{2} M V^2 + \frac{1}{2} J (\omega_{res})^2 .$$

La vitesse de rotation résiduelle de la lame est liée à la vitesse de projection par la relation géométrique

$$V = \omega_{res} \times r \rightarrow \omega_{res} = V / r$$

En introduisant cette relation et les valeurs des constantes M , J et r , nous obtenons une équation reliant E_{res} et V :

$$E_{res} = \frac{1}{2} M V^2 + \frac{1}{2} J V^2 / r^2 = \frac{1}{2} V^2 (M + J / r^2) = \frac{1}{2} V^2 (12.5 \text{ kg} + 0.0317 \text{ kg.m}^2 / (0.178 \text{ m})^2)$$

$$E_{res} = 6.75 V^2$$

Le tableau 4 présente la vitesse de projection avant de la scie en fonction du temps d'impact.

Tableau 4

Temps d'impact (sec)	Vitesse (m/s)
0.05	23.9
0.10	23.4
0.15	22.9
0.20	22.4
0.50	19.1

On peut y noter que les vitesses de projection avant de la scie sont importantes, même dans le cas limite à 0.2 seconde pour lequel la vitesse est de 22.4 m/s (81 km/h).

Situation 4 : coincement lors d'une coupe avec la partie frontale de la lame

Référant à la figure 3, on peut observer que si la partie frontale de la lame coince dans le plan de coupe et s'arrête sous l'effet du couple produit par l'augmentation soudaine de la force de coupe F_C , une réaction équivalente sera transférée au bâti de la scie par son moyeu, cependant dans cette situation la force sera verticale et orientée vers le haut. La partie avant de la scie sera alors poussée vers le haut. Les valeurs de forces réactives de poussée vers le haut sont celles présentées au tableau 2.

Considérant un point de pivot à la main droite de l'opérateur ou à la partie inférieure arrière de la scie si la main droite échappe la poignée, on peut évaluer la force vers le bas que doit soudainement exercer la main gauche en étudiant l'équilibre des moments autour du pivot. Dans le cas de l'impact de 0.2 seconde, pour empêcher la rotation de la scie vers lui, la main gauche de l'opérateur doit produire une force F_G telle que

$$(M - F_G) \times (0.203 \text{ m}) = F_C \times (0.635 \text{ m})$$

$$F_G = M - F_C \times (0.635 \text{ m}) / (0.203 \text{ m}) = 12.5 \text{ kg} - 45.6 \text{ kg} \times (0.635 \text{ m}) / (0.203 \text{ m}) = - 130 \text{ kg}$$

Il est assez clair qu'une telle force peut difficilement être développée par la main gauche de l'opérateur et que celui-ci risque d'être blessé.

La vitesse de rotation ω_{impact} de la scie par rapport au point pivot (main droite ou partie inférieure arrière de la scie en contact avec le sol) peut être évaluée par l'équation :

$$E_{\text{res}} = \frac{1}{2} J_{\text{scie}} (\omega_{\text{impact}})^2$$

dans laquelle E_{res} est l'énergie restituée calculée au tableau 3, et J_{scie} est le moment d'inertie polaire de la scie par rapport au point de pivot, évalué à 2.6 kg.m².

Le tableau 5 présente la vitesse de rotation de la projection de la scie autour du point pivot en fonction du temps d'impact.

Tableau 5

Temps d'impact (sec)	rotation (tour/s)
0.05	8.7
0.10	8.5
0.15	8.3
0.20	8.1
0.50	6.9

On peut y noter que les vitesses de rotation sont importantes : pour un temps d'impact de 0.2 seconde, la scie fait un demi-tour en moins de 0.1 seconde. C'est le temps requis pour que la lame se retourne vers l'opérateur.

À partir des résultats présentés dans ce chapitre, il est raisonnable d'affirmer que le coincement de la lame de la scie risque de résulter en une projection vers l'avant ou une rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de coupe, et que ceci constitue une situation dangereuse.

Il est également possible et probable que la projection principale soit accompagnée d'autres mouvements combinés, c'est-à-dire de rotations simultanées selon plusieurs axes. Ceci peut être attribuable au fait que le phénomène de coincement n'est pas nécessairement symétrique et qu'il peut produire une composante de projection latérale, ou encore une rotation autour de l'axe longitudinal de la scie (axe horizontal aligné avec le bâti de la scie). On imagine aisément que ces mouvements combinés à la projection principale de la scie rendent la situation imprévisible et difficilement maîtrisable par l'opérateur.

C'est vraisemblablement à cette situation que l'auteur du document cité en référence [3] réfère lorsqu'il rapporte des accidents similaires et mentionne que « in both of these accidents the cause was attributed to the jamming of the blade followed by instantaneous reactive forces that caused the saw to become uncontrollable ».

5 Conclusion

Dans ce rapport, deux situations de coupe avec une scie à béton ont été analysées, soit la coupe avec la partie inférieure de la lame ainsi que la coupe avec la partie frontale. Pour chacune de ces situations, les efforts produits par l'utilisation normale de la scie et ceux produits par le phénomène de coincement ont été calculés. Il en ressort que :

1) en situation de coupe avec la partie inférieure de la lame, l'opérateur doit retenir une force modérée qui tire la scie vers l'avant. Si un coincement de la lame se produit, cette force augmente soudainement de façon significative et risque de projeter la scie vers l'avant à grande vitesse.

2) la situation de coupe avec la partie frontale de la lame est plus dangereuse. L'opérateur doit retenir la scie avec des forces modérées, et le niveau relativement faible de ces forces peut réduire sa vigilance. Si un coincement de la lame se produit, des forces réactives intenses sont produites. L'intensité de ces forces est telle que dans la plupart des cas l'opérateur risque de ne pas pouvoir retenir la scie qui peut être projetée vers lui à grande vitesse.

Le danger inhérent à l'utilisation de ce type équipement est déjà reconnu, et les risques d'accidents sont élevés, comme en témoignent les événements récents et ceux qui sont enregistrés. La présente analyse fournit une évaluation quantitative de l'importance des forces impliquées dans ces accidents.



Jean Ruel, Ph.D., ing.

Québec, le 14 décembre 2006

Références

- [1] Engineering Mechanics, Volume 2 : Dynamics, 2nd Edition. Meriam J.L., Kraige, L.G. John Wiley and Sons, New York 1986.
- [2] Theory and Problems of Machine Design. Hall A.S., Holowenko A.R., Laughlin, H.G. Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, New York 1961.
- [3] Use of concrete cutting saws. Notice no. 30 de la série Hazard Alert du Gouvernement d'Australie Sud, disponible à l'adresse internet <http://www>
- [4] Travailler en sécurité avec la découpeuse. Manuel d'utilisation de la compagnie STIHL disponible à l'adresse internet http://www.stihl.de/safety_manuals/fr/Trennschleifgeraet_franzoesisch.pdf

ANNEXE E

Évaluation expérimentale des forces réactives produites par le coincement de la lame d'une découpeuse à disque

Rapport présenté à

Madame Isabelle Émond, ing.

Inspectrice à la Direction régionale de Québec de la
Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST)

par

Jean Ruel, Ph.D., ing.

Département de génie mécanique, Université Laval

3 avril 2007

Évaluation expérimentale des forces réactives produites par le coincement de la lame d'une découpeuse à disque

Jean Ruel, Ph.D., ing.

1 Introduction

Ce rapport fait suite au rapport intitulé « Évaluation analytique des forces impliquées dans le fonctionnement d'une scie à béton », produit en décembre 2006 ¹.

Il présente des mesures expérimentales effectuées sur un modèle réduit reproduisant les éléments principaux d'une découpeuse à disque.

L'objectif de ces essais était de confirmer les hypothèses formulées dans le premier rapport pour évaluer les forces produites par le coincement de la lame d'une découpeuse à disque, et ainsi confirmer que le coincement produit des forces réactives qui peuvent difficilement être contenues par l'opérateur.

¹ Référence [5].

2 Description du modèle réduit

Un modèle réduit de découpeuse à disque a été conçu par le bureau de design et fabriqué à l'atelier du département de génie mécanique de l'Université Laval. Une instrumentation de mesure y a été intégrée pour mesurer en temps réel les quantités physiques permettant de vérifier les hypothèses et les forces.

La figure 1 présente le modèle réduit. Ses principaux éléments sont un bâti en aluminium et une lame rotative (faite d'acier) supportée par un ensemble de roulements à billes. La lame rotative est mise en rotation par un moteur externe qui entraîne le disque pas sa périphérie. Le moteur n'est pas représenté sur la photo.

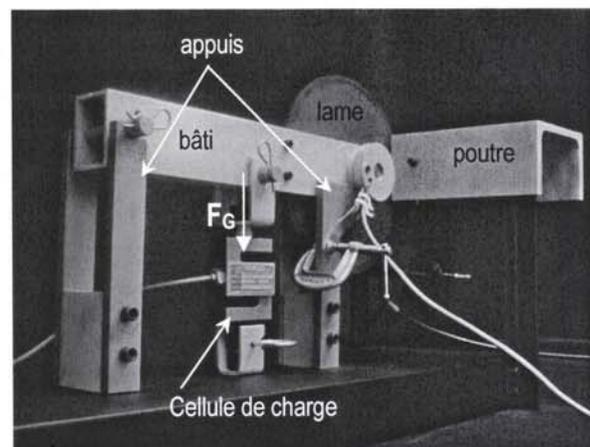


Figure 1

Dans ce rapport, le terme lame sera utilisé pour désigner la partie tournante seulement, tandis que le terme découpeuse à disque sera utilisé pour désigner l'équipement complet, incluant la lame.

Les caractéristiques de la lame rotative sont :

Diamètre de la lame	$D = 0.178 \text{ m}$
Masse de la lame	$m = 1.24 \text{ kg}$
Vitesse de rotation de la lame	$\omega = 1200 \text{ rpm} = 20 \text{ tour/sec} = 125.6 \text{ rad/sec}$
Moment d'inertie de la lame	$J = 0.005 \text{ kg.m}^2$

La lame est engagée dans une poutre en aluminium (voir la figure 1) représentant le bloc de béton qui doit être coupé par la découpeuse. À l'intérieur de la poutre, un frein a été installé pour permettre le coincement instantané la lame (voir la figure 2).

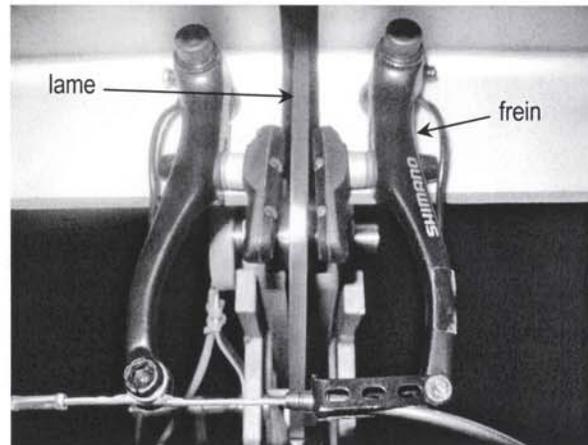


Figure 2

La configuration du montage peut être modifiée pour tester deux conditions de coupe, c'est-à-dire une coupe avec la partie frontale de la lame (comme c'est le cas sur la figure 1), et une coupe avec la partie inférieure de la lame (illustrée sur la figure 3).

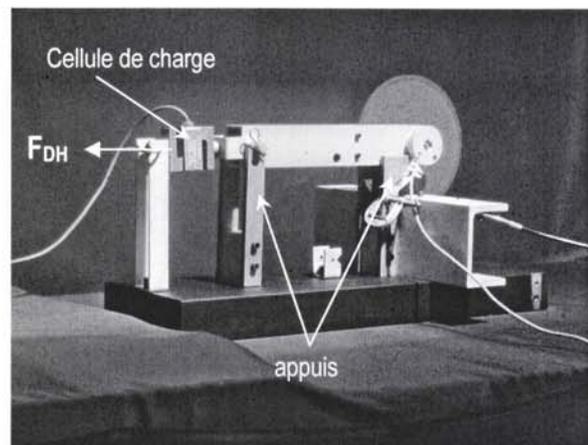


Figure 3

Le modèle réduit repose sur des appuis simples qui le supportent verticalement tout en lui laissant la liberté de se déplacer vers l'avant (c'est-à-dire vers la droite sur les photos) ou vers le haut, pour permettre les deux type de projection, le cabrage avec rotation vers l'arrière (coincement lors d'une coupe avec la partie frontale de la lame) ou la projection vers l'avant (coincement lors d'une coupe avec la partie inférieure de la lame).

Une cellule de charge (un senseur permettant de mesurer la force) retient le modèle comme le feraient les mains de l'opérateur.

Lors du coincement en situation de coupe avec la partie frontale (figure 1), la cellule de charge agit à l'endroit où agirait la main gauche de l'opérateur : elle produit une force verticale F_G dirigée vers le bas pour retenir la découpeuse et empêcher le cabrage.

De façon analogue, lors du coincement en situation de coupe avec la partie inférieure de la lame (figure 3), la cellule de charge agit à l'endroit où agirait la main droite de l'opérateur : elle produit une force horizontale F_{DH} dirigée vers l'arrière pour retenir la découpeuse et empêcher la projection avant.

L'instrumentation du montage est complétée par un senseur permettant de mesurer la vitesse de rotation de la lame immédiatement avant le coincement (Figure 4).

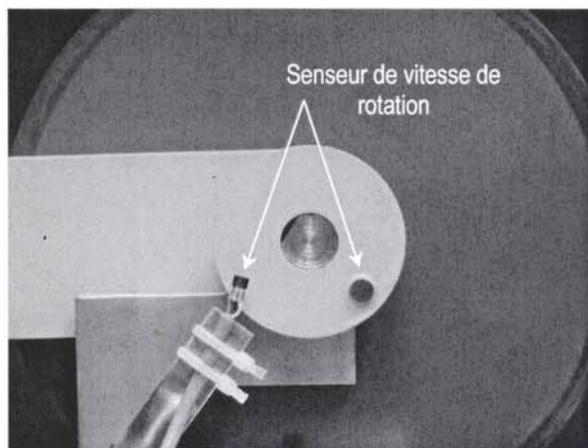


Figure 4

3 Rappel des hypothèses

Dans le premier rapport, il a été mentionné que les phénomènes physiques impliqués lors du coincement sont complexes, mais qu'ils peuvent être traités par la méthode des énergies en formulant certaines hypothèses.

► Les hypothèses suivantes ont permis l'analyse :

- 1 La durée de l'impact de décélération de la lame dû au coincement est très court. Une valeur limite jugée conservatrice a été fixée à 0.2 seconde.
- 2 Le couple de freinage attribuable au coincement crée un couple réactif qui projette la découpeuse à disque.
- 3 L'énergie cinétique de la lame est transférée à la découpeuse, ce qui en cause la projection.

► Ces hypothèses ont conduit au calcul des forces de retenue suivantes :

Cas de la coupe avec la partie frontale : en considérant un temps d'impact de 0.2 seconde, la main gauche doit retenir une force soudaine de 130 kg.

Cas de la coupe avec la partie inférieure de la lame : en considérant un temps d'impact de 0.2 seconde, la main droite doit retenir une force soudaine de 45.6 kg.

► Ces forces de retenues ont été obtenues par la suite de raisonnements suivants :

Le coincement produit un couple C exprimé par l'équation ²

$$C = J \, d\omega / dt$$

où J est le moment d'inertie de la lame et $d\omega / dt$ est son taux de décélération angulaire.

Ce couple se traduit par une force au point de coincement exprimée par

$$F_C = C / r$$

où r est le rayon de la lame.

² Voir la référence [1] à la page 389.

4 Résultats expérimentaux

Les hypothèses ont été vérifiées expérimentalement de la façon suivante :

- la lame du modèle réduit a été mise en rotation ;
- la vitesse de rotation a été mesurée ;
- le frein a été appliqué soudainement ;
- l'évolution de la force réactive a été mesurée en temps réel à l'aide de la cellule de charge, d'un système d'acquisition de données et d'un ordinateur ;
- la durée du coincement a été évaluée à partir des données ;
- la durée du coincement et la vitesse de rotation ont permis de calculer le taux de décélération angulaire $d\omega / dt$;
- le couple C , puis la force de coincement F_c ont pu être évalués ³.

Coincement lors d'une coupe avec la partie frontale de la lame

La figure 5 présente la configuration du modèle réduit lors de cette expérience, ainsi que les forces impliquées.

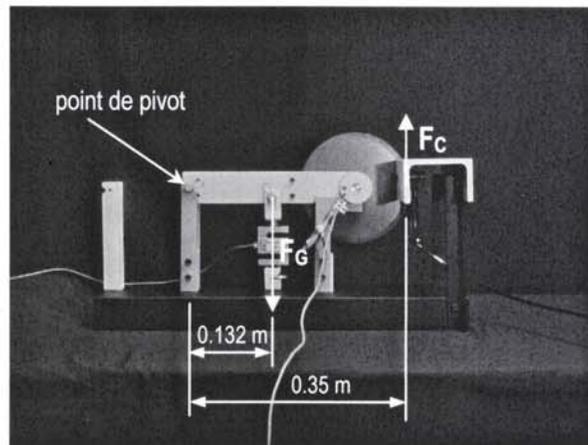


Figure 5

³ Le moment d'inertie polaire de la lame du modèle réduit par rapport à l'axe de rotation est $J = 0.005 \text{ kg.m}^2$.

Dans ce cas, la force de coincement F_C produira un couple cherchant à faire tourner la découpeuse à disque dans le sens anti-horaire autour du pivot arrière. Cependant, la découpeuse à disque est retenue en équilibre par la cellule de charge qui produit un couple réactif égal mais de sens opposé de sorte que l'ensemble est stable. La force F_G mesurée par la cellule de charge correspond à celle qui devrait être appliquée par la main gauche de l'opérateur sur la poignée centrale pour éviter le cabrage.

L'équilibre statique des forces implique que

$$F_C \times 0.35 \text{ m} = F_G \times 0.132 \text{ m}$$

Cette équation permet, à partir des équations présentées à la section 3, de calculer la force théorique qui devrait être mesurée par la cellule de charge en vertu des hypothèses qui doivent être vérifiées par cette expérience.

Le tableau 1 présente les résultats obtenus pour les essais expérimentaux de coincement avec la partie frontale.

On y retrouve :

- la vitesse de rotation avant le coincement ;
- le temps d'impact ;
- la force F_G maximale mesurée par la cellule de charge ;
- la force F_G théorique calculée à partir des hypothèses.

Tableau 1

Essai	Vitesse de rotation (rpm)	Temps d'impact (sec)	Force F_G maximale mesurée (kg)	Force F_G théorique calculée (kg)
1	1245	0.051	61.8	42.1
2	1310	0.047	76.8	47.9
3	1260	0.048	78.6	45.2

Discussion des résultats

Première observation

La première chose qu'on peut observer est la rapidité de l'impact : pour les trois essais présentés, les temps d'impact sont de l'ordre de 0.050 seconde, soit quatre fois plus petit que la limite de 0.2 seconde.

Cette première observation permet d'affirmer que

l'hypothèse selon laquelle la durée de l'impact est plus courte que 0.2 seconde est confirmée (ainsi que le caractère conservateur de cette valeur).

Par le fait même, ceci implique que

les forces réelles risquent d'être plus importantes que celle prédite avec la valeur de 0.2 seconde, soit F_G 130 kg.

Il est aussi intéressant de mentionner que l'arrêt de la lame s'effectue en moins d'un tour.

Deuxième observation

On remarque également que les valeurs théoriques calculées de la force F_G , (ces valeurs sont celles qui devraient normalement être mesurées avec la cellule de charge) sont plus faibles que les valeurs effectivement mesurées.

Cette différence s'explique de la façon suivante : le raisonnement théorique conduisant à l'évaluation des forces réactives suppose que le couple de freinage est constant pendant tout le coincement. Or, l'observation de la figure 6, qui présente l'évolution de la force F_G mesurée en fonction du temps pendant un essai de coincement ⁴, nous montre qu'en réalité la force F_G varie pendant l'impact. Puisque la quantité d'énergie à dissiper est donnée par l'énergie cinétique de la lame avant l'impact, si le couple de freinage est inférieur à la valeur moyenne (la valeur constante supposée par le raisonnement théorique) pendant certains intervalles de temps du coincement, il doit en contrepartie être supérieur à d'autres moments. C'est ce qui peut être observé sur la figure 6.

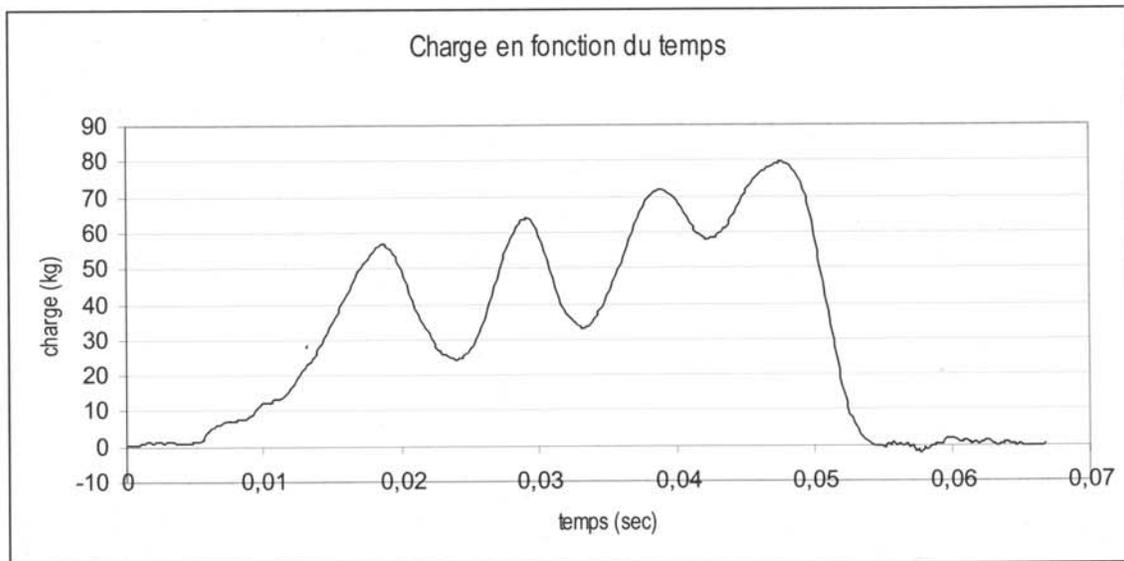


Figure 6

En fait, si l'on considère la valeur moyenne de la force F_G mesurée avec la cellule de charge plutôt que la valeur maximale, nous obtenons les résultats présentés au tableau 2 : les valeurs de force

⁴ Il s'agit des données de l'essai 3.

moyenne mesurée pendant l'impact sont très près des valeurs théoriques calculées. Ceci confirme la justesse de l'analyse théorique, et le fait d'avoir accès à l'information concernant la valeur instantanée de la force nous renseigne de façon très pertinente sur le fait que la valeur instantanée de la force peut dépasser de façon significative la valeur moyenne.

Tableau 2

Essai	Force F_G maximale mesurée pendant l'impact (kg)	Force F_G théorique calculée (kg)	Force moyenne mesurée pendant l'impact (kg)
1	61.8	42.1	38.6
2	76.8	47.9	44.4
3	78.6	45.2	43.7

En résumé,

Les résultats expérimentaux obtenus avec le modèle réduit confirment clairement que l'approche utilisée pour évaluer les forces réactives lors du coincement de la lame d'une découpeuse à disque est très appropriée et décrit bien la situation réelle.

Suite à l'analyse de l'évolution en temps réel de la force F_G , on peut également ajouter que

la force maximale réelle risque de dépasser la valeur prédite à un instant donné pendant le coincement, ce qui renforce ici encore le caractère prudent et conservateur des estimés initiaux.

Coincement lors d'une coupe avec la partie inférieure de la lame

La figure 7 présente la configuration du modèle réduit lors de cette expérience, ainsi que les forces impliquées.

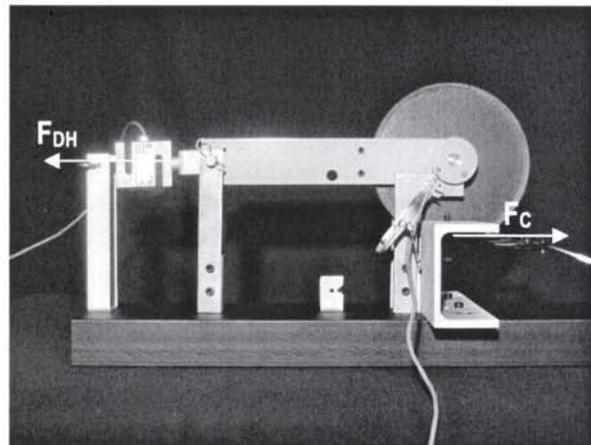


Figure 7

Dans ce cas, c'est l'équilibre des forces horizontales qui nous intéresse : la force de coincement F_C est égale à la force F_{DH} mesurée par la cellule de charge, et cette force correspond à celle qui doit normalement être retenue par l'opérateur. Le tableau 3 présente les résultats obtenus.

Tableau 3

Essai	Vitesse de rotation (rpm)	Temps d'impact (sec)	Force maximale mesurée (kg)	Force théorique calculée (kg)
4	1095	0.065	14.5	11.0
5	1080	0.038	25.5	18.5
6	1140	0.038	28.2	19.5

Discussion des résultats

Ici encore, les mêmes observations s'appliquent :

Les résultats expérimentaux obtenus avec le modèle réduit confirment clairement que l'approche utilisée pour évaluer les forces réactives lors du coincement de la lame d'une découpeuse à disque est très appropriée et décrit bien la situation réelle.

Suite à l'analyse de l'évolution en temps réel de la force F_G , on peut également ajouter que

la force maximale réelle risque de dépasser la valeur prédite à un instant donné pendant le coincement, ce qui renforce ici encore le caractère prudent et conservateur des estimés.

5 Conclusion

Dans ce rapport, les résultats expérimentaux d'essais réalisés sur un modèle réduit instrumenté de découpeuse à disque ont été présentés.

L'objectif de ces essais était de confirmer les hypothèses formulées pour évaluer les forces produites par le coincement de la lame de la découpeuse à disque, et ainsi confirmer que le coincement produit des réactions qui peuvent difficilement être contenues par l'opérateur ⁵.

Les conclusions de ces essais sont les suivantes :

1. les résultats expérimentaux obtenus avec le modèle réduit confirment clairement que l'approche utilisée pour évaluer les forces réactives lors du coincement de la lame d'une découpeuse à disque est très appropriée et décrit bien la situation réelle ;
2. l'hypothèse selon laquelle la durée de l'impact est plus courte que 0.2 seconde est confirmée (ainsi que le caractère conservateur de cette valeur) ;
3. les forces réelles risquent d'être plus importantes que celles prédites. En effet,
 - a. la durée des impact observés est quatre fois moins importante que la limite fixée de 0.2 seconde, et
 - b. pendant l'impact, des forces maximales instantanées significativement plus importantes que la valeur moyenne ont été mesurées.



Jean Ruel, Ph.D., ing.

Québec, le 3 avril 2007

⁵ Voir reference [5].

Références

- [1] Engineering Mechanics, Volume 2 : Dynamics, 2nd Edition. Meriam J.L., Kraige, L.G. John Wiley and Sons, New York 1986.
- [2] Theory and Problems of Machine Desing. Hall A.S., Holowenko A.R., Laughlin, H.G. Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, New York 1961.
- [3] Use of concrete cutting saws. Notice no. 30 de la série Hazard Alert du Gouvernement d'Australie Sud, disponible à l'adresse internet <http://www>
- [4] Travailler en sécurité avec la découpeuse. Manuel d'utilisation de la compagnie STIHL disponible à l'adresse internet http://www.stihl.de/safety_manuals/fr/Trennschleifgeraet_franzoesisch.pdf
- [5] Évaluation analytique des forces impliquées dans le fonctionnement d'une scie à béton. Rapport d'expertise produit pour la direction régionale de Québec de la Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST), Ruel, J., 2006.

ANNEXE F

Références bibliographiques

Travailler en sécurité avec la découpeuse, STIHL, Internet

Mode d'emploi, STIHL TS 400 Cutquick

ISO 19432:2006, Building construction machinery and equipment-Portable, hand-held, internal combustion engine driven cut-off machines-Safety requirements and testing

ANSI B7.5-1990, Safety code for the construction, use, and care of gasoline-powered, hand-held, portable, abrasive cutting-off machines

Government of Western Australia, Code of practice, Concrete and masonry cutting and drilling, 2004

ANSI B7.1-2000, Safety Requirements for the Use, Care and Protection of Abrasive Wheels