

EN004083**RAPPORT D'ENQUÊTE**

**Accident mortel survenu le 1^{er} septembre 2015
à un travailleur de la Ville de Chibougamau,
sur le boulevard Hamel Ouest à Chibougamau**

VERSION DÉPERSONNALISÉE

Direction régionale du Saguenay–Lac-Saint-Jean

Inspecteurs :

Rémi Gilbert, ing.

Carolyne Savard

Date du rapport : 24 février 2016

Rapport distribué à :

- Madame [A], [...], Ville de Chibougamau
- Madame [B], [...],[...], Ville de Chibougamau
- Comité de santé et de sécurité, Ville de Chibougamau
- Monsieur [C], [...], Syndicat canadien de la fonction publique, section locale 1269
- Docteur Pierre Brochu, coroner
- Docteur Donald Aubin, directeur de la santé publique

TABLE DES MATIÈRES

<u>1</u>	<u>RÉSUMÉ DU RAPPORT</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>ORGANISATION DU TRAVAIL</u>	<u>3</u>
2.1	STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'ÉTABLISSEMENT	3
2.2	ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	4
2.2.1	MÉCANISMES DE PARTICIPATION	4
2.2.2	GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	4
<u>3</u>	<u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	<u>5</u>
3.1	DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	5
3.2	DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	6
3.3	SPÉCIFICATIONS DE LA DÉCOUPEUSE, DU DISQUE ET DU TUYAU	7
3.3.1	DÉCOUPEUSE À DISQUE	7
3.3.2	DISQUE	7
3.3.3	SEGMENT DE TUYAU COUPÉ	7
<u>4</u>	<u>ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u>	<u>8</u>
4.1	CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	8
4.2	CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	9
4.2.1	CONSTATATIONS FAITES PAR LES INSPECTEURS	9
4.2.2	TÉMOIGNAGES RECUEILLIS	9
4.2.3	CONSIGNES DE L'EMPLOYEUR	11
4.2.4	INFORMATIONS ET DIRECTIVES DU FABRICANT DE LA DÉCOUPEUSE À DISQUE	12
4.2.5	EXPERTISE	12
4.3	ÉNONCÉ ET ANALYSE DES CAUSES	16
4.3.1	LE DISQUE EN ROTATION DE LA DÉCOUPEUSE FRAPPE LE TRAVAILLEUR AU COU	16
4.3.2	LA MÉTHODE DE TRAVAIL UTILISÉE POUR COUPER UNE PIÈCE NON SUPPORTÉE PERMET LE COINCEMENT PARTIEL DU DISQUE DE LA DÉCOUPEUSE	17
<u>5</u>	<u>CONCLUSION</u>	<u>18</u>
5.1	CAUSES DE L'ACCIDENT	18
5.2	AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE	18
5.3	RECOMMANDATIONS	18

ANNEXES

ANNEXE A :	Accidenté	19
ANNEXE B :	Liste des témoins et des autres personnes rencontrées	20
ANNEXE C :	Rapport d'expertise – Expertech	21
ANNEXE D :	Programme de prévention – Ville de Chibougamau	90
ANNEXE E :	Notice d'emploi – STIHL	91
ANNEXE F :	Travailler en sécurité avec la découpeuse à disque – STIHL	92
ANNEXE G :	[...]	93

SECTION 1**1 RÉSUMÉ DU RAPPORT****Description de l'accident**

Le 1^{er} septembre 2015, une équipe de travailleurs du service des travaux publics de la Ville de Chibougamau réalise des travaux de prolongement d'aqueduc sur le boulevard Hamel Ouest à Chibougamau. Alors qu'un travailleur est en train de couper une section de conduite d'aqueduc au fond d'une excavation, celui-ci perd le contrôle de la découpeuse à disque qu'il utilise. La découpeuse est projetée en l'air selon une trajectoire circulaire et le disque en rotation frappe le travailleur au cou.

Conséquence

Deux jours plus tard, le travailleur succombe à ses blessures.



Photo 1 : Lieu de l'accident
Source : Sûreté du Québec

Abrégé des causes

L'enquête a permis d'identifier les causes suivantes :

- Le disque en rotation de la découpeuse frappe le travailleur au cou.
- La méthode de travail utilisée pour couper une pièce non supportée permet le coincement partiel du disque de la découpeuse.

Mesures correctives

Le 1^{er} septembre, le jour de l'accident, l'inspectrice appose le scellé E56192 et saisit la découpeuse à disque aux fins d'enquête. De plus, elle interdit l'utilisation par l'employeur de toute découpeuse à disque, car il n'y a pas de procédure de travail sécuritaire et les travailleurs ne sont pas formés par l'employeur. Finalement, l'accès à l'excavation est également interdit, car il y a danger d'effondrement des parois. Le rapport d'intervention RAP9096290 qui consigne l'ensemble de ces décisions est remis sur place.

Le 3 septembre, l'inspecteur autorise la reprise des travaux dans l'excavation (rapport d'intervention RAP9096291).

Le présent résumé n'a pas comme tel de valeur légale et ne tient lieu ni de rapport d'enquête, ni d'avis de correction ou de toute autre décision de l'inspecteur. Il ne remplace aucunement les diverses sections du rapport d'enquête qui devrait être lu en entier. Il constitue un aide-mémoire identifiant les éléments d'une situation dangereuse et les mesures correctives à apporter pour éviter la répétition de l'accident. Il peut également servir d'outil de diffusion dans votre milieu de travail.

SECTION 2**2 ORGANISATION DU TRAVAIL****2.1 Structure générale de l'établissement**

La Ville de Chibougamau, ci-après nommée l'employeur, est une administration municipale qui compte [...] employés. Elle fournit divers services d'administration publique à la population, dont celui des travaux publics.

Le Service des travaux publics est chargé, entre autres, de l'entretien préventif et de la réparation du réseau de distribution d'eau potable et du réseau d'égout pluvial et sanitaire. Celui-ci compte près de [...] travailleurs et un contremaître qui relèvent du directeur des travaux publics, services techniques et hygiène du milieu.

Le directeur des travaux publics dirige, planifie et organise l'ensemble des travaux du service. Le contremaître supervise, avec l'aide d'un chef d'équipe, la réalisation des travaux.

2.2 Organisation de la santé et de la sécurité du travail

2.2.1 Mécanismes de participation

L'établissement est classé dans le secteur d'activité Affaires municipales. Une association sectorielle paritaire offre des services de soutien pour les employeurs de ce secteur. [...].

Il y a un comité de santé et de sécurité au sein de la municipalité. Des membres patronaux et syndicaux composent ce comité. Les représentants des travailleurs proviennent des différentes équipes de travail. Cependant, il n'y a aucun représentant patronal du service des travaux publics au sein du comité.

[...]

2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

[...], la gestion de la santé et de la sécurité relève du directeur du service de sécurité incendie. Un travailleur agit comme conseiller sécurité et effectue divers projets en lien avec la santé et la sécurité du travail. Celui-ci seconde le directeur dans ses tâches.

L'employeur dispose d'un programme de prévention. Ce programme traite de divers risques et dangers reliés aux activités de la ville. [...], le conseiller sécurité présente le programme à tout le personnel. Il le rend ensuite disponible aux travailleurs des travaux publics à leur salle de pause.

Le programme de prévention comprend, pour les travaux publics, une méthode de travail pour les excavations et pour l'utilisation d'outils, mais ne prévoit rien pour la découpeuse à disque. De plus, il prévoit des visites d'inspection non planifiées sur les lieux de travail.

SECTION 3**3 DESCRIPTION DU TRAVAIL****3.1 Description du lieu de travail**

Le boulevard Hamel Ouest est perpendiculaire à la 3^e Rue, artère principale de la ville de Chibougamau. Un site d'entraînement pour les pompiers se situe à l'extrémité ouest du boulevard. Les travaux se déroulent au fond d'une tranchée excavée sur toute la largeur du boulevard. Le temps est ensoleillé et il fait près de 20 °C.



Photo 2 : Vue de la tranchée
Source : CNESST

3.2 Description du travail à effectuer

Une équipe de [...] travailleurs entreprend des travaux afin d'installer une conduite d'amenée d'eau jusqu'au site d'entraînement des pompiers, situé au bout du boulevard Hamel Ouest. Pour ce faire, une section de la conduite d'aqueduc existante, perpendiculaire à la rue, doit être coupée. Le travailleur utilise une découpeuse à disque. Par la suite, on prévoit installer un raccordement en T afin d'y brancher une nouvelle conduite jusqu'au site d'entraînement.



Photo 3 : Point de raccordement pour la nouvelle conduite d'aqueduc
Source : Sûreté du Québec, modifiée CNESST

3.3 Spécifications de la découpeuse, du disque et du tuyau

3.3.1 Découpeuse à disque

Marque : STIHL

Modèle : TS800

Puissance du moteur : 5 000 W

Vitesse nominale de la broche : 4 600 tr/min

Masse : 13 kg

Masse incluant le disque, l'essence et l'huile : 16,6 kg



Photo 4 : Découpeuse à disque STIHL TS800
Source : CNESST

3.3.2 Disque

Marque : STIHL

Modèle : B10

Type : disque diamanté

Diamètre : 40 cm

3.3.3 Segment de tuyau coupé

Type : tuyau en fonte

Longueur : 64 cm

Diamètre extérieur : 17,5 cm

Épaisseur de la paroi : 9,5 mm

Masse : 17 kg

SECTION 4**4 ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE****4.1 Chronologie de l'accident**

Le 1^{er} septembre 2015, une équipe de travailleurs entreprend des travaux de prolongement de l'aqueduc sur le boulevard Hamel Ouest à Chibougamau.

Cette équipe se compose de [...] travailleurs. [...] d'entre eux sont au niveau du sol et opèrent les équipements suivants : une pelle hydraulique, une chargeuse et la pompe du camion vacuum. Les [...] travailleurs sont au fond de l'excavation, occupés aux tâches suivantes : l'un d'eux replace le tuyau de pompage pour évacuer l'eau et les deux autres, le chef d'équipe et M. [**D**] (ci-après appelé « travailleur »), coupent la conduite d'aqueduc alimentant une borne-fontaine.

À l'aide de la découpeuse à disque, le travailleur effectue la première coupe de la conduite. Il se place d'abord du côté de la paroi de l'excavation pour faire la majeure partie de la coupe. Puis, il se déplace de l'autre côté de la conduite pour finaliser la coupe. Il remet ensuite l'outil au [...].

Celui-ci, alors placé du côté de la paroi de l'excavation, commence la deuxième coupe. Par la suite, il redonne la découpeuse au travailleur, qui est en face de lui, pour qu'il termine la coupe.

Vers 11 h 40, le travailleur prend la découpeuse à disque et entreprend la finalisation de la coupe. Au moment où la coupe est complétée, le travailleur perd le contrôle de la découpeuse. Celle-ci est propulsée vers le haut, selon une trajectoire circulaire, et le travailleur reçoit le disque en rotation dans le cou. Il repousse la découpeuse vers le [...] qui la reçoit sur la cuisse, du côté du moteur.

Le [...] et un autre travailleur lui prodiguent immédiatement les premiers secours afin de contrôler l'hémorragie. Pendant ce temps, un appel est logé au 911. Par la suite, les ambulanciers transportent le travailleur à l'hôpital de Chibougamau.

Dans l'après-midi, le travailleur est déplacé à Québec par avion-ambulance. Celui-ci décède deux jours plus tard des suites de ses blessures.

4.2 Constatations et informations recueillies

4.2.1 Constatations faites par les inspecteurs

La section coupée du tuyau a une longueur de 64 cm. Son diamètre extérieur est de 17,5 cm. C'est un tuyau en fonte.

Il y a une marque en forme de spirale sur l'un des côtés du disque. En examinant d'autres disques, on constate que les traces d'usure sur les côtés des disques sont de forme circulaire, parallèlement au périmètre du disque.

4.2.2 Témoignages recueillis

Les témoignages recueillis auprès de travailleurs et de représentants de l'employeur ont permis de dégager les éléments qui suivent.

4.2.2.1 Informations générales

- Le tuyau à couper est sec.
- Le sol est excavé jusqu'à environ 20 cm sous la conduite d'aqueduc à couper.
- Selon les travailleurs, un disque diamanté peut couper le métal, la fonte, le béton et l'acier.
- Le [...] mentionne que le disque reste sur la découpeuse tant que les diamants ne sont pas usés.

4.2.2.2 Déroulement de l'accident

- Le [...] mentionne qu'il est nécessaire d'effectuer la coupe en deux fois (d'un côté, puis de l'autre) pour un tuyau ayant un diamètre de plus de 15 cm, car le disque n'est pas assez grand pour le couper en une seule fois.

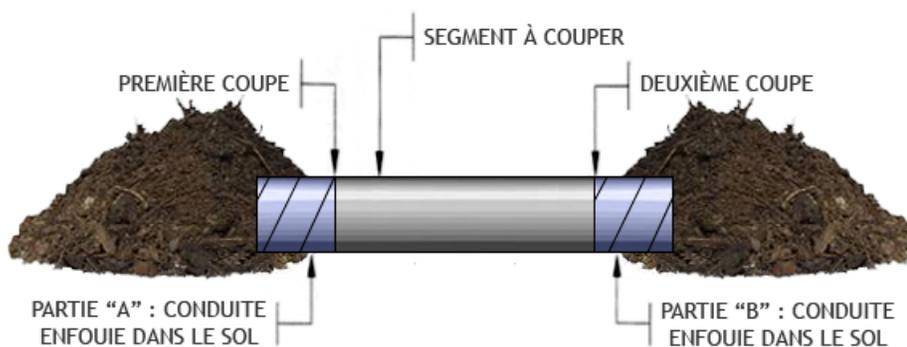


Figure 1 : Conduite d'aqueduc à couper
Source : CNESST

- Le travailleur effectue la première coupe sur les deux côtés.
- Le [...] fait la majeure partie de la deuxième coupe.
- Il reste environ 5 cm à couper, au bas du tuyau, pour finir la deuxième coupe.
- C'est le travailleur qui finalise la deuxième coupe.
- Le travailleur insère le disque dans le trait de scie perpendiculairement, en poussant vers l'avant.
- Selon le [...], la dernière coupe a été faite avec la section du bas du disque.
- Le [...] est placé de l'autre côté du tuyau et voit bien le déroulement de l'accident.



Photo 5 : Le disque entre dans le trait de scie pour finaliser la deuxième coupe
Source : Rapport Expertech

- Le [...] voit le segment de tuyau coupé tomber au sol.
- En même temps, il voit la découpeuse monter à plus d'un mètre en l'air, en suivant une trajectoire circulaire de 180 degrés, et atteindre le cou du travailleur qui est en position penchée, vers l'avant.
- Par la suite, le [...] reçoit la découpeuse sur la cuisse, du côté du moteur.

4.2.2.3 Méthode de travail

- Le [...] mentionne que, pour couper, on tient la machine à deux mains, l'une sur la poignée arrière et l'autre sur le garde.
- Selon lui, ce n'est pas nécessairement une habitude de faire la coupe à deux travailleurs.
- Il mentionne également que la coupe d'un tuyau ne nécessite pas d'élingues.
- Ils utilisent parfois des élingues pour soutenir un bout de tuyau coupé. C'est utile pour sortir la section de tuyau hors de la tranchée quand la longueur est de 90 cm et plus, à cause du poids.
- Le [...] n'a pas pris connaissance de la notice d'emploi du fabricant.

4.2.2.4 Supervision

- Le [...] se rend trois fois sur le site des travaux au cours de l'avant-midi et ne note pas de lacune au point de vue de la sécurité.
- Le [...] ne sait pas s'il y a une procédure pour le coupage avec la découpeuse, dans le programme de prévention.
- Le [...] ne sait pas s'il y a un manuel d'utilisation du fabricant disponible.
- Le [...] n'a aucune formation pour l'utilisation de la découpeuse.
- Le [...] mentionne que le programme de prévention lui a été présenté.
- Le [...] ignore si les travailleurs ont une formation pour la découpeuse à disque.
- Le [...] ne connaît pas les méthodes de travail sécuritaires à appliquer lors de l'utilisation d'une découpeuse.

4.2.3 Consignes de l'employeur

Des travailleurs transmettent aux autres des explications de base sur le fonctionnement de la découpeuse à disque, par exemple : comment la démarrer, comment faire le plein d'essence. Aucun travailleur n'a reçu de formation spécifique par l'employeur concernant son utilisation.

L'employeur n'a défini aucune méthode de travail pour l'utilisation de la découpeuse à disque.

4.2.4 Informations et directives du fabricant de la découpeuse à disque

Voici quelques éléments tirés du document du fabricant intitulé « STIHL TS700, 800 notice d'emploi » :

- Les forces de réaction les plus fréquentes sont le rebond et la traction.
- Un rebond se produit lorsque le disque se coince (surtout dans le quart supérieur) ou lorsqu'il est fortement freiné en frottant contre un objet solide.
- Pour réduire le risque de rebond : fixer solidement l'objet à découper et le caler de telle sorte que la coupe reste bien ouverte au cours du travail et à la fin du découpage.
- Toujours exécuter la dernière coupe de telle sorte que le disque ne risque pas d'être coincé et que la chute de la partie coupée ne représente pas de risque pour l'utilisateur.
- Avant la séparation définitive de la partie coupée, il faut tenir compte du poids de cette partie coupée, de son déplacement possible après la séparation et du fait qu'elle peut se trouver sous contrainte.

Ces éléments se retrouvent également dans le document de STIHL « Travailler en sécurité avec la découpeuse à disque ».

Par ailleurs, dans le cadre d'une enquête antérieure, le fabricant STIHL fournit des informations à la CSST, dans une lettre datée du 30 mai 2007, au sujet de la découpeuse à disque. Le fabricant explique alors que les forces générées par la rotation du disque rendent impossible la conception d'un frein permettant l'immobilisation rapide du disque (voir Annexe G).

4.2.5 Expertise

Lors de cette enquête, la CSST a recours aux services d'Expertech afin de mieux comprendre l'accident. Le rapport, signé par M. Michel Bouchard, ing., M. Sc., Ph. D., est complété en décembre 2015 (voir Annexe C).

Le rapport met en évidence quelques éléments concernant le disque de la découpeuse et une explication de l'empreinte retrouvée sur l'un des côtés du disque. De plus, il comporte une évaluation des forces et énergies en cause pendant son utilisation et plus particulièrement au moment de l'accident, selon l'hypothèse la plus probable.

4.2.5.1 Caractéristiques du disque de la découpeuse

Tout d'abord, il est constaté que le disque est bien installé sur la découpeuse. Celui-ci n'a pas de voilement, mais présente certains signes d'usure.

Le disque en place sur la découpeuse, au moment de l'accident, est un disque à diamants, de marque STIHL, modèle B10, d'un diamètre de 40 cm. Ce type de disque n'est pas recommandé pour la coupe d'objets en fonte. Le fabricant recommande plutôt l'utilisation d'un disque en résine synthétique.

4.2.5.2 Empreinte sur la surface du disque

Sur l'un des côtés du disque, il y a une marque en forme de spirale qui débute près de la rondelle de fixation et qui se termine entre deux sections diamantées (voir photo 6). Cette empreinte est du côté droit du disque, soit du côté de la partie B du tuyau dans le sol (voir figure 1).



Photo 6 : Empreinte sur le côté du disque
Source : Rapport Expertech

Cette marque est vraisemblablement due à une friction excessive du disque, à la fin de la deuxième coupe, sur la paroi du tuyau solidement ancré dans le sol.

Lorsque le segment coupé devient libre, le disque se déplace le long de la surface de coupe tout en continuant son mouvement de rotation et en faisant contact avec le tuyau fixe. Ce double mouvement explique la présence de la marque de friction, en forme de spirale, sur le côté du disque.

4.2.5.3 Forces et énergies lors de l'utilisation de la découpeuse

Tout d'abord, l'expert suppose que le moteur de la découpeuse tourne à sa vitesse maximale, tel que recommandé par le fabricant pour une efficacité optimale lors de la coupe.

L'expertise décrit quelques situations de coupe, soit coupe avec la partie inférieure du disque (à 90 degrés), coupe intermédiaire (à 45 degrés) et coupe frontale (voir figure 2).

Par la suite, l'expert procède à une évaluation analytique des forces impliquées dans le fonctionnement d'une découpeuse à disque pour ces diverses situations de coupe.

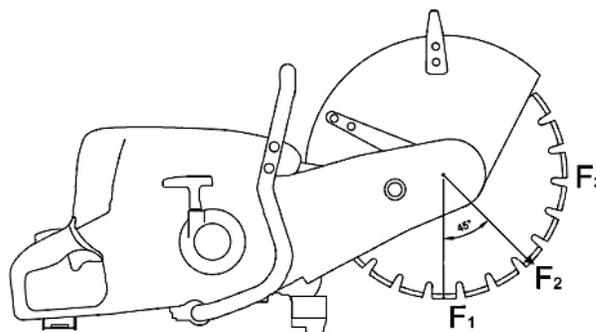


Figure 2 : Portions du disque potentiellement utilisées pour la coupe :
F1 coupe à 90 degrés; F2 coupe à 45 degrés; F3 coupe frontale
Source : CNESST

Il évalue notamment que, lors d'une coupe à 45 degrés (voir F2, figure 2) au cours de laquelle le disque se coince pendant 0,1 à 0,2 seconde, sa vitesse de rotation passe brusquement de 4 600 à 1 000 tours par minute.

Les valeurs qui suivent décrivent les amplitudes des énergies et réactions de la découpeuse. Pour une énergie initiale du disque de 5 800 joules, le couple de freinage du disque pendant le coincement serait de 94 à 188 newtons-mètres. L'énergie cinétique emmagasinée par la découpeuse est de 270 joules et le moment tournant exercé sur la découpeuse de 162 à 397 newtons-mètres. Pendant ce temps, le disque fait environ cinq tours.

Dans tous les cas de coincement étudiés, alors que le disque coupe sous un angle de 45 degrés ou avec sa partie frontale, des moments bien supérieurs à 100 newtons-mètres sont engendrés. Dans cette situation, il y a un risque élevé de perte de contrôle de la machine. Les forces nécessaires pour maintenir la découpeuse sont alors trop grandes pour que l'opérateur ait le temps et l'énergie suffisants pour réagir.

Ce type d'outil ne comporte pas de système de freinage automatique. Lorsque la découpeuse fonctionne à plein régime et que l'on coupe brusquement les gaz, le disque continue à tourner à une vitesse relativement élevée pendant environ 10 secondes et diminue par la suite jusqu'à l'arrêt complet, 45 secondes plus tard.

4.2.5.4 Conclusion de l'expertise

L'accident survient à la fin de la deuxième coupe du segment de tuyau en fonte. De chaque côté de la coupe, deux parties de conduite restent solidement enfouies dans le sol.

À ce moment, le disque entre très profondément dans le trait de coupe. L'hypothèse la plus probable est celle d'une coupe à 45 degrés.

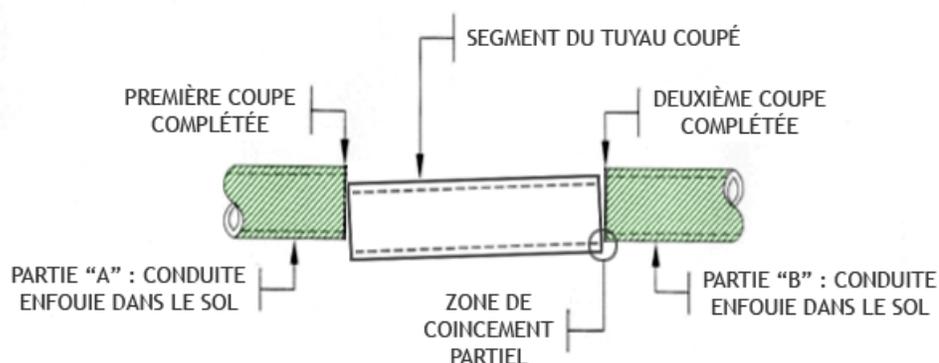


Figure 3 : Coincement partiel du disque de la découpeuse, en fin de coupe
Source : Rapport Expertech, modifiée CNESST

À la fin de la coupe, le segment, qui n'est plus retenu à l'autre extrémité, est libéré et son poids l'entraîne vers le bas. Ce mouvement déstabilise le segment qui, après un contact avec l'extrémité de la conduite enfouie du côté du premier trait de coupe, se déplace horizontalement vers l'autre partie de conduite enfouie. Cela provoque un coincement partiel du disque pendant une fraction de seconde. Le côté du disque en rotation fait contact avec la conduite enfouie.

Le moment tournant appliqué au point de contact propulse la découpeuse vers le haut. Celle-ci suit une trajectoire quasi circulaire, d'environ 180 degrés, en direction du travailleur.

4.3 Énoncé et analyse des causes

4.3.1 Le disque en rotation de la découpeuse frappe le travailleur au cou

Afin de réaliser des travaux de prolongement de l'aqueduc, une section de la conduite existante doit être coupée. Une tranchée a été excavée pour accéder à cette conduite qui est enfouie dans le sol.

À l'aide d'une découpeuse à disque, le travailleur effectue une première coupe du côté gauche de la conduite.

La partie de conduite à couper (segment) n'est pas appuyée ni soutenue.

À la fin de la deuxième coupe, le segment, qui n'est plus retenu à l'autre extrémité, est libéré et son poids l'entraîne vers le bas. Il s'appuie momentanément sur la paroi de la conduite enfouie, du côté gauche, puis il oscille entre les deux parois de la conduite enfouie.

Cela provoque alors un coincement partiel du disque de la découpeuse, pendant une fraction de seconde. L'analyse du disque démontre un contact entre le disque et la conduite enfouie.

La vitesse de rotation du disque passe brusquement de 4 600 à 1 000 tours par minute. L'expertise établit qu'un moment tournant de 162 à 397 newtons-mètres s'exerce alors sur la découpeuse.

Les forces nécessaires pour maintenir la découpeuse sont trop grandes pour que le travailleur ait le temps et l'énergie suffisants pour réagir. Il perd le contrôle de la découpeuse.

Cet outil ne comporte pas de système de freinage automatique. Lorsqu'il fonctionne à plein régime et que l'on coupe brusquement les gaz, le disque continue à tourner pendant environ 45 secondes.

Les forces en présence propulsent la découpeuse en l'air, selon une trajectoire circulaire, vers le travailleur.

Le disque en rotation de la découpeuse frappe le travailleur au cou.

Cette cause est retenue.

4.3.2 La méthode de travail utilisée pour couper une pièce non supportée permet le coincement partiel du disque de la découpeuse

Une découpeuse à disque est utilisée pour couper une section de conduite en fonte au fond d'une tranchée.

Le programme de prévention ne prévoit rien pour l'utilisation d'une découpeuse à disque. L'employeur n'a défini aucune méthode de travail pour le coupage avec une découpeuse à disque.

Le contremaître et le directeur des travaux publics ne connaissent pas les méthodes de travail sécuritaires à appliquer lors de l'utilisation d'une découpeuse à disque. Ils s'en remettent à l'expérience des travailleurs pour exécuter ce travail.

Les travailleurs n'ont aucune formation sur l'utilisation sécuritaire de la découpeuse. Ils n'ont pas pris connaissance de la notice d'utilisation du fabricant.

La notice du fabricant mentionne que l'utilisateur doit fixer solidement l'objet à découper et le caler de telle sorte que la coupe reste bien ouverte au cours du travail et à la fin du découpage.

Le segment de conduite à couper n'est pas appuyé ni supporté. Le travailleur effectue une coupe à 45 degrés avec le disque de la découpeuse.

La méthode de travail utilisée pour couper une pièce non supportée permet le coincement partiel du disque de la découpeuse.

Cette cause est retenue.

SECTION 5**5 CONCLUSION****5.1 Causes de l'accident**

L'enquête a permis d'identifier les causes suivantes :

- Le disque en rotation de la découpeuse frappe le travailleur au cou.
- La méthode de travail utilisée pour couper une pièce non supportée permet le coincement partiel du disque de la découpeuse.

5.2 Autres documents émis lors de l'enquête

Le 7 octobre 2015, des représentants patronaux, syndicaux et du comité de santé et de sécurité participent à l'outil d'évaluation de prise en charge de la santé et de la sécurité. Le rapport RAP0946424 indiquant les résultats est transmis aux parties.

Le 5 novembre 2015, l'employeur transmet les outils qui seront utilisés afin de s'assurer de l'application du programme de prévention en lien avec les tranchées et les excavations. La dérogation est effectuée et consignée dans le rapport RAP0946428.

Le 25 janvier 2016, l'inspectrice accepte une méthode de travail sécuritaire pour l'utilisation de la découpeuse à disque. Toutefois, l'interdit d'utilisation de ce type d'équipement demeure tant que les travailleurs ne seront pas formés à cette méthode de travail. Cela est consigné dans le rapport RAP0946443.

Le 27 janvier 2016, la découpeuse à disque impliquée dans l'accident est remise à l'employeur. La décision est levée et le rapport RAP9116303 est remis sur place.

5.3 Recommandations

Afin d'éviter la répétition d'événements semblables, la CNESST diffusera les conclusions de ce rapport d'enquête à l'Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec, à l'Association de la construction du Québec, à l'Association de location du Québec, à l'Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec, à l'Association Québécoise des Entrepreneurs en Infrastructure, à l'Association des chefs en sécurité incendie du Québec et à l'Association des paysagistes professionnels du Québec.

La CNESST diffusera aussi le rapport d'enquête aux fabricants de découpeuses à disque et à Santé Canada.

ANNEXE A

Accidenté

Nom, prénom : [D]

Sexe : masculin

Âge : [...]

Fonction habituelle : [...]

Fonction lors de l'accident : journalier spécialisé

Expérience dans cette fonction : [...]

Ancienneté chez l'employeur : [...]

Syndicat : [...]

ANNEXE B

Liste des témoins et des autres personnes rencontrées

Monsieur [**E**], [...], Ville de Chibougamau
Monsieur [**F**], [...], Ville de Chibougamau
Monsieur [**G**], [...], Ville de Chibougamau
Monsieur [**H**], [...], Ville de Chibougamau
Monsieur [**I**], [...],[...], Ville de Chibougamau
Madame [**B**], [...],[...], Ville de Chibougamau
Monsieur Ian Boily, enquêteur, Sûreté du Québec

ANNEXE C

Rapport d'expertise – Expertech

RAPPORT D'EXPERTISE TECHNIQUE**ANALYSE DES CIRCONSTANCES D'UN ACCIDENT
MORTEL IMPLIQUANT UN TRAVAILLEUR,
SURVENU LE 1ER SEPTEMBRE 2015 ET
ÉVALUATION DES FORCES ET ÉNERGIES
POUVANT ÊTRE IMPLIQUÉES LORS DE
L'UTILISATION D'UNE DÉCOUPEUSE
À DISQUE**

**Pour : COMMISSION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ AU TRAVAIL
DU QUÉBEC, DIRECTION RÉGIONALE DU SLSJ**

**Par : Michel Bouchard, ing., M.Sc., Ph.D.
Dossier: EXP-350915**

5 DÉCEMBRE 2015

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	CONTEXTE DE L'ACCIDENT : BRÈVE DESCRIPTION.....	2
3.	CARACTÉRISTIQUES DE LA DÉCOUPEUSE UTILISÉE	3
4.	QUELQUES TESTS ET OBSERVATIONS SUR LA DÉCOUPEUSE.....	4
4.1.	Premières observations.....	4
4.2.	Examen du disque de la découpeuse.....	5
4.3.	Empreinte en forme de spirale sur la surface du disque.....	7
5.	CALCULS RELATIFS À L'USAGE DE LA DÉCOUPEUSE DANS DIFFÉRENTES SITUATIONS	9
5.1.	Quelques renseignements et calculs concernant les forces et énergies impliquées dans l'utilisation normale d'une découpeuse.....	9
5.2.	Analyse des forces générées par la coupe en situation normale de travail: hypothèses et cas étudiés.....	13
5.3.	Évaluation des forces et énergies générées lors d'un coincement partiel du disque	26
5.4.	Moment tournant exercé sur la découpeuse lors d'un coincement partiel du disque	38
5.5.	Rotation probable de la découpeuse lors d'un coincement du disque	42
5.6.	Résumé des calculs effectués.....	44
6.	SOMMAIRE	47
7.	CONCLUSION.....	50
8.	RECOMMANDATIONS	50
9.	RÉFÉRENCES	52

Figures: 1 à 11

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

ANNEXE 1: GUIDE PRÉPARÉ PAR STIHL MONTRANT LES DIFFÉRENTES APPLICATIONS
DES DISQUES DIAMANTÉS SELON LE TYPE (GRADE) DE PRODUITS

ET

«ABRASIVE WHEEL FOR ASPHALT AND DUCTILE IRON»

EXPERTECH - Rapport préliminaire d'expertise - Dossier 350915

1. INTRODUCTION

Un malheureux accident s'est produit lors de travaux d'aqueduc sur le boulevard Hamel, à Chibougamau. Un travailleur a subi une coupure sévère au cou alors qu'il s'affairait à couper un tuyau en fonte. Le travailleur utilisait une puissante découpeuse à disque de marque Stihl au moment de l'accident.

À la demande de la CSST et suite à une proposition de notre part, nous avons analysé les circonstances et les éléments techniques de l'accident, afin de contribuer à préciser la chaîne de causalité qui a conduit à ce malheureux événement.

Notre mandat, tel que défini par l'ingénieur Rémi Gilbert, consistait essentiellement à :

- i) Identifier le disque en place sur la découpeuse, décrire son état et vérifier son installation. Expliquer la méthode utilisée par les travailleurs et les risques qui y sont associés. Évaluer si chacun de ces éléments est adéquat pour couper un tuyau en fonte dans une excavation.
- ii) Analyser la strie en forme de spirale sur le disque. Expliquer comment elle a été produite.
- iii) Expliquer la trajectoire de la découpeuse (mouvement circulaire vers le haut).

Le présent rapport d'expertise fait état des résultats de notre analyse du dossier et des calculs effectués, de même que nos conclusions et recommandations.

2. CONTEXTE DE L'ACCIDENT : BRÈVE DESCRIPTION

Selon l'information qui nous a été transmise, l'accident du 1er septembre 2015 se serait produit dans les circonstances suivantes :

Deux travailleurs procédaient à l'installation d'un branchement d'aqueduc en forme de T au milieu d'une rue de la municipalité de Chibougamau. L'excavation du sol, pour accéder au tuyau d'aqueduc concerné, avait déjà été effectuée et les deux travailleurs étaient en train de couper le tuyau en fonte de 6 pouces de diamètre nominal lorsque l'accident s'est produit. Il fallait couper ce tuyau à deux endroits rapprochés d'environ 60 cm (2 pieds), afin de libérer un espace suffisant pour installer le nouveau raccord de branchement.

Une première coupe avait été effectuée par le travailleur directement impliqué dans l'accident, sans difficulté. Il a utilisé une découpeuse de marque Stihl TS800.

Le chef d'équipe s'est chargé d'une très grande partie de la deuxième coupe; il était alors installé du côté le plus rapproché de la zone excavée (voir figure 1). Pour terminer le travail de coupe, le chef d'équipe a demandé à l'autre travailleur (la victime), déjà en position opposée et probablement plus favorable, de couper la section restante du tuyau à l'aide de la même découpeuse munie d'une disque au diamant. Cette section restante était localisée dans la partie la plus basse du tuyau (voir figure 2).

Vers la toute fin de la coupe, le disque de la découpeuse aurait possiblement coincé partiellement ou serait entrée en contact avec les surfaces déjà coupées du tuyau; le segment ainsi coupé de ce tuyau serait, pratiquement au même moment, tombé dans le fond de l'excavation.

Sous l'effet des conditions spéciales de fin de coupe, la découpeuse aurait été projetée vers le travailleur et le disque, encore en rotation, lui aurait causé des blessures mortelles au cou.

Par la suite, on aurait immédiatement pris les mesures d'urgence qui s'imposaient. La Sûreté du Québec se serait rendue sur les lieux pour sécuriser la zone de travail concernée. Dans un deuxième temps, deux inspecteurs de la CSST se seraient aussi rendus sur les lieux et auraient débuté l'enquête en regard de ce très malheureux accident.

Pour notre part, nous avons pris connaissance des circonstances de l'accident par l'intermédiaire de M. Rémi Gilbert, enquêteur à la CSST et responsable du dossier concerné. Ce dernier nous a remis la découpeuse impliquée dans l'accident, de même que le segment de tuyau coupé, pour fins d'expertise technique.

3. CARACTÉRISTIQUES DE LA DÉCOUPEUSE UTILISÉE

La découpeuse utilisée pour effectuer le travail de coupe du tuyau en fonte est de marque Stihl, modèle TS800. Cette découpeuse possède les principales caractéristiques suivantes: (voir références 3 et 4)

- Moteur deux-temps, monocylindrique de 98,5 cm³, ayant une puissance nominale de 5,0 kW à 9300 tours/minute.
- Régime maximal de la broche: 4600 tours/min, (482 rad/sec.)
Régime au ralenti: 2200 tours/min.
- Actionnement de l'embrayage centrifuge: 3200 tours/min.
- Poids à vide, sans disque à découper: 13,0 kg
- Disque à découper diamanté compatible

- Diamètre extérieur du disque de coupe: 400 mm
- Diamètre d'alésage/diamètre de broche: 20 mm
- Couple de serrage du disque: 30 N. m
- Diamètre extérieur minimal de la rondelle de pression avant: 103 mm
- Profondeur de coupe maximale: 145 mm

Le centre de masse de la découpeuse est localisé au niveau du cadre central de l'appareil, dont la partie supérieure sert de poignée (voir figure 3).

4. QUELQUES TESTS ET OBSERVATIONS SUR LA DÉCOUPEUSE

4.1. Premières observations

Dans un premier temps, nous avons examiné sommairement la découpeuse, de même que le segment de tuyau de fonte qui avait été coupé sur le chantier concerné.

La découpeuse est de marque Stihl, modèle TS800; elle possède une masse d'environ 16,6 kg (incluant le disque, l'essence et l'huile). Elle est munie d'un disque au diamant.

Lorsque la découpeuse fonctionne à plein régime et qu'on coupe brusquement les gaz, le disque continue à tourner à vitesse relativement élevée pendant environ 10 secondes; par la suite, sa vitesse de rotation diminue progressivement jusqu'à l'arrêt complet (environ 45 secondes). Rappelons que selon le fabricant, le mécanisme centrifuge d'embrayage de la découpeuse devient effectif lorsque la vitesse de rotation du moteur est supérieure à 3200 rpm. Par conséquent, au-dessus de cette vitesse, le moteur et le disque tournent ensemble dans un rapport constant de vitesse de rotation, par l'intermédiaire de deux poulies et d'une courroie.

En dessous de 3200 rpm, le disque peut tourner quasi librement indépendamment du moteur.

Le segment de tuyau en fonte dont on finalisait la coupe lors de l'accident, possède une longueur d'environ 64 centimètres. Son diamètre extérieur est d'environ 175 mm et sa paroi possède une épaisseur d'environ 9.5 mm; sa masse est d'environ 17 kilos.

La surface de la première coupe du segment est inégale (non plane) alors que la deuxième coupe présente une surface relativement plane et perpendiculaire à l'axe longitudinal du tuyau. Sur cette deuxième surface de coupe, on a noté qu'il y avait deux petites régions qui présentaient des indices de frottement ou d'usure (voir figure 4).

On a également observé que le disque de la découpeuse doit entrer profondément dans le tuyau pour atteindre la partie la plus basse de la pièce évidée (voir figure 5).

Dans cette situation, le risque de coincement du disque est significatif, notamment si la pièce à couper n'est pas solidement retenue en position stable. Cette situation est illustrée à la figure 6.

4.2. Examen du disque de la découpeuse

Nous avons examiné le disque de la découpeuse pendant qu'il était encore installée sur l'équipement.

On a constaté qu'il s'agit d'un disque diamanté de 400 mm de diamètre. Le disque était bien installé et sa surface est plane, pratiquement sans voilement.

Dans un deuxième temps, nous avons démonté le disque et avons effectué quelques mesures et observations:

- i) Le disque est de marque Stihl, modèle B10, no. 08350907024 (voir figure 7); selon le fabricant, ce type de disque est recommandé pour la coupe du béton avec ou sans armature d'acier (voir annexe 1); ce disque n'est pas recommandée pour la coupe de la fonte ductile ou pour le béton fortement renforcé d'armature en acier.
- ii) Il n'y avait pratiquement pas de diamant visible sur la partie frontale du disque.
- iii) Les éléments diamantés en périphérie du disque présentent des indices de glaçage («glazing») (voir figures 8 et 9).

Selon la documentation disponible, préparée par des fabricants de produits abrasifs (voir référence 10), les disques diamantés sont susceptibles d'être encrassés ou contaminés par des dépôts métalliques lors de la coupe de matériaux relativement mous. Les petits diamants coupants seraient trop durs par rapport au métal à couper; par conséquent, leurs surfaces n'useraient pas et pourraient ne pas se nettoyer lors de la coupe d'un métal ou d'un alliage mou. De plus, selon un représentant de Stihl, un coincement sévère du disque pourrait entraîner un rebond de la découpeuse; sur ce plan, un disque diamanté représente un danger plus important qu'un disque abrasif conventionnel, car ce dernier type de disque aura tendance à se fracturer quand il est fortement coincé, évitant ainsi un rebond de la découpeuse; il possède également une inertie plus faible.

Par ailleurs, nous avons noté que les segments diamantés, tout près de la partie frontale du disque, sont très légèrement amincis (voir figure 10).

4.3. Empreinte en forme de spirale sur la surface du disque

Nous avons examiné avec attention la surface du disque de coupe avec segments diamantés en périphérie.

On a notamment constaté que sur l'un des côtés, il y avait une marque indélébile en forme de spirale qui débute non loin de la rondelle de fixation du disque et qui se termine dans une encavure entre deux sections diamantées (voir figure 11). On a aussi noté la présence de rayures dans une région qui se situe entre la spirale susmentionnée et les segments diamantés.

Ces empreintes se situent uniquement sur un côté du disque (côté droit) lorsque l'opérateur tient la découpeuse avec ses deux mains; ce côté du disque était en contact avec la partie du tuyau solidement fixée dans le sol lors de l'accident (voir figure 2).

Une friction excessive du disque sur la paroi du tuyau solidement ancré dans le sol lors de la deuxième coupe pourrait être en cause.

Rappelons que l'accident s'est produit vers la toute fin de la deuxième coupe du segment de tuyau concerné.

À ce dernier moment, le segment du tuyau n'était plus solidement fixé à ses extrémités. Il pouvait donc se déplacer, notamment en direction du sol. Le temps de chute de ce segment, pour se retrouver sous les deux parties fixes du long tuyau d'aqueduc, est de l'ordre d'une petite fraction de seconde (~ 0.2 sec.), s'il est complètement libre (sans friction à ses extrémités).

Au début de cette fraction de seconde, la partie diamantée du disque de coupe se retrouvait fort probablement à l'endroit de fin de coupe du tuyau, soit profondément à l'intérieur de la section de conduit en fonte (voir figure 5).

Comme pendant cette fraction de seconde le segment de tuyau concerné n'était plus retenu, il pouvait momentanément s'appuyer sur la paroi déjà coupée (1^{ère} coupe) et sur le disque de la découpeuse, il pouvait osciller entre ces deux parois (voir figure 6). Cette situation, pendant que le disque tournait probablement à grande vitesse, pouvait créer des conditions instables et ce, durant une partie du temps de chute du segment de tuyau et que le disque de la découpeuse se retrouvait encore dans la zone de contact avec les parois déjà coupées.

Ce contexte particulier était susceptible de créer un freinage ou un coincement du disque en rotation et une force de réaction proportionnelle à l'amplitude de ce blocage partiel. Sous l'effet de cette force de réaction, la découpeuse a pu se déplacer pratiquement au même moment où le segment de tuyau amorçait sa chute vers le fond de l'excavation.

Pendant cette sortie, le double mouvement du disque (rotation et déplacement le long de la surface de coupe) pourrait contribuer à expliquer la présence d'une bande de friction noire, en forme de spirale, observée sur un côté du disque.

5. CALCULS RELATIFS À L'USAGE DE LA DÉCOUPEUSE DANS DIFFÉRENTES SITUATIONS

5.1. *Quelques renseignements et calculs concernant les forces et énergies impliquées dans l'utilisation normale d'une découpeuse*

L'ingénieur Jean Ruel a déjà bien analysé les forces et énergies pouvant décrire les conditions normales d'utilisation d'une découpeuse Stihl, modèle TS400 (voir référence 1).

Dans les paragraphes qui vont suivre, on utilisera la même méthode d'analyse que celle utilisée par l'ingénieur Ruel, en y apportant cependant les données pertinentes d'une découpeuse Stihl TS800 et en incluant une hypothèse de coupe intermédiaire entre une coupe par la partie inférieure du disque et celle d'une coupe par la partie frontale du disque. On ajoutera également certains éléments de calcul en regard des énergies cinétiques à considérer lors d'un éventuel coincement partiel du disque.

Rappelons que l'utilisation normale de la découpeuse consiste à tenir à deux mains, l'une sur la poignée arrière (main droite) permettant l'actionnement de l'accélérateur du moteur deux-temps et l'autre (main gauche), sur la poignée supérieure située pratiquement au-dessus du centre de gravité de l'appareil.

Lorsque le moteur deux-temps fonctionne et que la découpeuse est tenue en position normale par l'opérateur, l'accélérateur peut être actionné pour mettre le disque en mouvement (l'embrayage s'effectue au voisinage de 3200 tours/min. selon la documentation Stihl). Le manufacturier préconise d'effectuer la coupe avec la partie inférieure du disque (voir référence 3). Il mentionne également que: «si le contact a lieu avec la partie frontale du disque, ce dernier aura tendance à remonter sur l'objet à découper et à sortir de la coupe (cabrage).

De plus, si la partie avant du disque se coince, tout spécialement dans le quart supérieur, la découpeuse peut être brusquement projetée vers le haut et vers l'arrière, en décrivant un mouvement de rotation très violent en direction de l'opérateur. Ce phénomène peut être très dangereux («danger de mort»).

Dans les paragraphes qui suivent, une analyse des forces impliquées dans le fonctionnement normal de la découpeuse sera présentée pour les situations de coupe suivantes:

- i) coupe avec la partie inférieure du disque (90 degrés);
- ii) coupe intermédiaire (~ 45 degrés);
- iii) coupe frontale.

Dans un deuxième temps, quelques calculs seront présentés en regard d'un éventuel coincement du disque de la découpeuse en posant quelques hypothèses pertinentes.

Pour les fins de calculs, il faut notamment connaître les principales dimensions de la découpeuse, la position de son centre de masse (CM) et son poids (163 Newtons). Ces dimensions sont présentées à la figure 5.1.

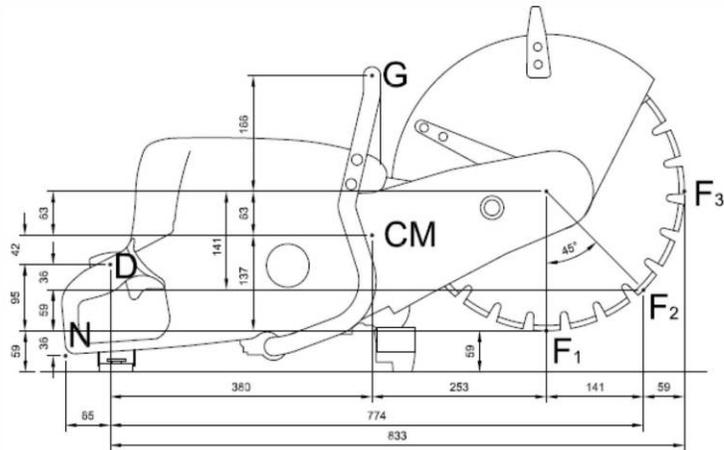


Figure 5.1: Principales dimensions de la découpeuse Stihl TS800 exprimées en millimètres. Les points F₁, F₂ et F₃ indiquent les endroits potentiels de coupe pour lesquels on a effectué des calculs: F₁ coupe à 90 degrés; F₂ coupe à 45 degrés; F₃ coupe frontale.

Il faut également connaître la puissance disponible du moteur, le couple appliqué sur le disque et la force de coupe sur la partie abrasive du disque (partie diamantée dans le présent dossier). Cette force de coupe F_c peut être évaluée de la façon décrite ci-après.

Lors de la coupe, la puissance disponible du moteur (~ 5000W) est transmise au disque par l'intermédiaire de poulies et d'une courroie. Le rendement est d'environ 95% (voir référence 1).

Le disque dispose donc d'une puissance nominale (P_{disque}) d'environ:

$$P_{\text{disque}} \simeq 0.95 \times P_{\text{moteur}} \simeq 5000 \times .95 = 4750 \text{ watts}$$

Cette puissance peut être exprimée en fonction du couple $C\ell$ et de la vitesse de rotation du disque ω (exprimée en radian par seconde) à l'aide de l'équation:

$$P_{\text{disque}} = C\ell \times \omega$$

Connaissant P_{disque} et ω on peut calculer le couple $C\ell$ exercé sur le disque:

$$C\ell = \frac{P_{\text{disque}}}{\omega} = \frac{4750}{482} \simeq 9.85 \text{ Newtons-mètres}$$

Le couple P_{disque} sert à maintenir le disque en mouvement pendant la coupe, c'est-à-dire à vaincre la force de coupe F_c exercée à la périphérie du disque (partie diamantée). Ce couple peut être exprimé en fonction de la force F_c et du rayon r du disque par l'équation $C\ell = F_c \times r$

On peut donc calculer la force de coupe:

$$F_c = \frac{C\ell}{r} = \frac{9.85}{0.2 \text{ m}} \simeq 49 \text{ Newtons}$$

Cette force de coupe, lorsque la découpeuse opère à pleine puissance, interviendra dans plusieurs des calculs qui suivent.

5.2. Analyse des forces générées par la coupe en situation normale de travail: hypothèses et cas étudiés

CAS NO.1: Coupe avec la partie inférieure du disque, illustrée à la figure 5.2; deux scénarios seront étudiés.

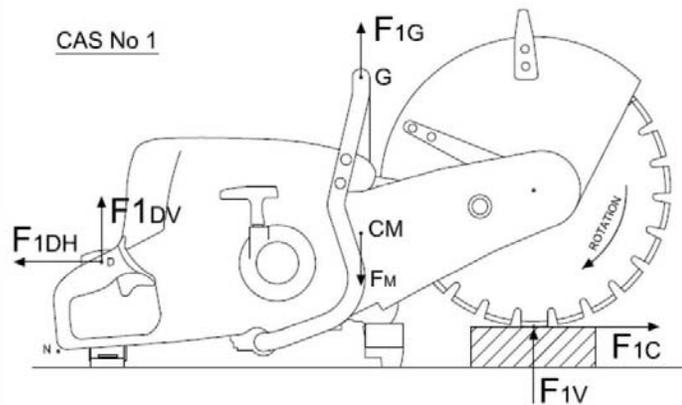


Figure 5.2: Schéma montrant les forces exercées sur la découpeuse lorsque la coupe s'effectue perpendiculairement à la base de l'appareil

À la figure 5.2, les forces impliquées dans la coupe sont superposées sur le schéma de la découpeuse TS800. La force exercée par la main droite sur la poignée arrière a été divisée en une composante horizontale F_{1DH} et une composante verticale F_{1DV} . La force exercée par la main gauche F_{1G} est essentiellement verticale; elle se situe au-dessus du centre de masse de l'appareil.

Les forces exercées par le disque sur l'objet à découper sont décrites par les composantes F_{1v} et F_{1c} . La composante F_{1c} est générée par la friction et l'abrasion du disque en rotation et en contact avec l'objet à couper; la force F_{1v} varie notamment selon les autres forces exercées sur la découpeuse.

Scénario no. 1.1 ($F_{1v} = 0$)

L'opérateur tient la scie avec ses deux mains et effectue la coupe sans exercer de pression vers le bas de la découpeuse; dans ce cas, $F_{1v} = 0$ (friction sur les côtés du disque seulement, pas de force verticale sur la partie frontale de la couronne).

La première situation analysée est celle où l'opérateur tient la découpeuse à deux mains et n'exerce aucune force verticale sur le disque ($F_{1v} = 0$).

L'équilibre quasi statique des forces horizontales sur la découpeuse implique la présence d'une force F_{1DH} exercée de la main droite, égale et opposée à la force de coupe F_{1c} , donc:

$$F_{1DH} = F_{1c} = 49 \text{ N } (\sim 5 \text{ kgf ou } \sim 11 \text{ lb})$$

La hauteur entre le point d'application de la force de coupe F_{1c} et la prise de la main droite sur la poignée arrière dépend de plusieurs paramètres, tels la profondeur d'enfoncement du disque dans la coupe et l'angle de l'axe longitudinal de la découpeuse par rapport à l'objet à couper. Une valeur moyenne de 95 mm ($\sim 3,7$ po.) sera utilisée pour les calculs en supposant que la découpeuse est en position horizontale. L'équilibre des moments par rapport au centre de masse de la découpeuse implique que (voir dimensions à la figure 5.1):

$$F_{1DH} \times 0,042 \text{ m} + F_{1DV} \times 0,38 \text{ m} - F_{1c} \times 0,137 \text{ m} = 0$$

Sachant que F_{1c} et F_{1DH} ont chacune une valeur de 49 N, on obtient:

$$F_{1DV} \simeq 12 \text{ N} (\sim 3 \text{ lb})$$

L'équilibre des forces verticales sur la découpeuse implique également que:

$$F_{1DV} + F_{1G} = F_M = 163 \text{ N} = 12 + F_{1G}$$

$$\text{d'où } F_{1G} = 151 \text{ N} (\sim 34 \text{ lb})$$

Ainsi, le poids de la découpeuse est principalement porté par la main gauche de l'opérateur; la charge totale ($F_{1G} + F_{1DV}$) correspond au poids de la découpeuse, soit 163 N. Il faut également que l'opérateur exerce une force de retenue vers l'arrière de 49 N pour empêcher la découpeuse d'avancer. Ces forces sont pas trop élevées et peuvent normalement être compensées par l'intervention de l'opérateur sans problème.

Scénario no. 1.2 ($F_{1G} = 0$)

L'opérateur tient la découpeuse avec ses deux mains mais n'exerce aucune force vers le haut avec sa main gauche ($F_{1G} = 0$) et effectue la coupe en laissant porter l'équipement de coupe sur sa disque. Ce cas est relativement confortable pour l'opérateur car il laisse le poids de la découpeuse porter sur le disque de coupe et il exerce principalement une force horizontale de retenue avec sa main droite.

De nouveau l'équilibre des forces horizontales sur la découpeuse implique l'application d'une force F_{1DH} exercée de la main droite et opposée à la force de coupe F_{1c} ; donc:

$$F_{1DH} = F_{1c} = 49 \text{ N}$$

Considérant l'équilibre des moments par rapport à l'endroit où la main droite maintient la découpeuse par la poignée arrière (point D), il faut que:

$$163 \text{ N} \times 0,38 \text{ m} = 49 \text{ N} \times 0.095 + F_{1v} \times 0.633 \text{ m}$$

$$\text{d'où } F_{1v} \simeq 90 \text{ N} (\sim 20 \text{ lb})$$

L'équilibre des forces verticales sur la découpeuse implique également que:

$$F_{1DV} + F_{1v} = F_M = 163 \text{ N}$$

$$\text{donc: } F_{1DV} = 163 - 90 = 73 \text{ N} (\sim 6 \text{ lb})$$

Ainsi, seule la main droite exerce des forces sur la découpeuse, soit une force de retenue vers l'arrière F_{1DH} de 49 N et une force verticale F_{1DV} de 73 N.

Dans ce cas, les forces que doit exercer l'opérateur sont faibles, ce qui peut conduire à une vigilance réduite et augmenter le temps de réaction en cas de problème ou de changement brusque des forces à la toute fin de la coupe de l'objet ou du tuyau concerné.

CAS NO. 2: (angle de coupe à 45 degrés)

Ce cas de coupe à un angle de contact de 45 degrés par rapport à l'axe longitudinal de la découpeuse est illustré aux figures 5.3 et 5.4.

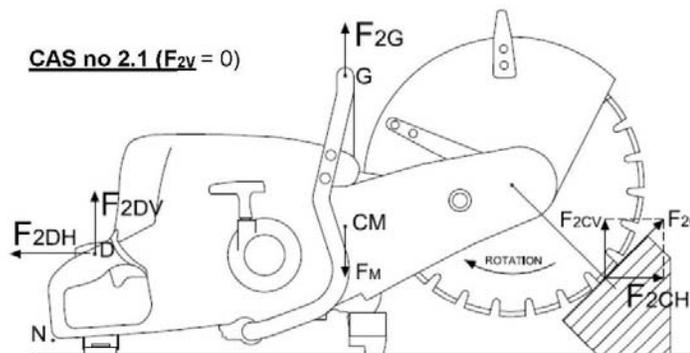


Figure 5.3 Schéma montrant les forces qui s'exercent sur la découpeuse lors d'une coupe à 45 degrés. Dans une première situation, on a supposé que l'objet à couper n'exerçait pas de force verticale sur le disque ($F_v = 0$). On considère donc la force générée par la coupe (F_{2c}), la force exercée par la main gauche (F_{2G}) et les deux composantes (F_{2DH} et F_{2DV}) de la force exercée par la main droite de l'opérateur. On suppose que la découpeuse est à l'horizontale.

Scénario 2.1 ($F_{2v} = 0$)

Dans ce scénario, l'opérateur tient la découpeuse avec ses deux mains en exerçant notamment une force verticale (F_{2G}) avec sa main gauche. Cependant, la force de contact (F_{2v}) de la partie frontale du disque avec l'objet à couper est, par hypothèse, nulle; il y a seulement une force d'abrasion avec la paroi latérale du disque où il y a des particules de diamant.

L'équilibre des forces horizontales sur la découpeuse implique la présence d'une force F_{2DH} exercée de la main droite égale et opposée à la composante horizontale de la force de coupe F_{2CH} .

Dans le présent cas, $F_{2CH} = 0,707 F_c \simeq 35 \text{ N}$

et F_{2cv} est aussi égale à 35 N

donc: $F_{2DH} \simeq 35 \text{ N}$

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 (point D) est évaluée à environ 36 mm; cette hauteur dépend en pratique de plusieurs paramètres tels que la profondeur d'enfoncement du disque dans la coupe et l'angle de l'axe longitudinal de la découpeuse par rapport au sol.

L'équilibre des moments par rapport au centre de la masse de la découpeuse implique que:

$$F_{2DV} \times 0.38 + F_{2DH} \times 0.042 - F_{2CV} \times 0.394 - F_{2CH} \times 0.078 = 0$$

$$F_{2DV} \times 0.38 = 35 \times 0.394 + 35 \times 0.078 - 35 \times 0.042$$

$$F_{2DV} = 35 (.394 + 0.078 - 0.042) / .38 \simeq 40 \text{ N } (\sim 9 \text{ lb})$$

L'équilibre des forces verticales sur la découpeuse implique que:

$$F_{2DV} + F_{2G} + F_{2CV} = F_M = 163 \text{ N}$$

$$40 + 35 + F_{2G} = 163 \text{ d'où } F_{2G} \simeq 88 \text{ N } (\sim 20 \text{ lb})$$

Dans ce cas, où l'on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de force appliquée sur la partie frontale du disque ($F_{2v} = 0$), on note que l'opérateur doit compenser en exerçant notamment une force verticale importante ($\sim 104 \text{ N}$) avec sa main droite afin de maintenir la découpeuse en équilibre.

En comparant avec le cas précédent, on note qu'à la fin de coupe il y aura une brusque augmentation de la force verticale F_{2G} que devra exercer l'opérateur. Selon les hypothèses susmentionnée, cette force passe brusquement de zéro à 88 N ($\sim 20 \text{ lb}$). Elle peut donc générer une déstabilisation de la découpeuse.

Scénario 2.2 ($F_{2G} = 0$)

Cette situation de coupe avec un angle de contact d'environ 45 degrés est illustrée à la figure 5.4.

Dans ce cas, l'équilibre des forces horizontales sur la découpeuse implique la présence d'une force F_{2DH} exercée de la main droite, qui compense l'effet des autres forces horizontales s'exerçant sur le disque au point de contact F_2 avec l'objet à couper. Si la force de coupe exercée à 45 degrés est égale à 49 N (voir cas précédent), alors:

$$F_{2CH} = F_{2CV} = 0.707 \times F_{2C} \simeq 35 \text{ N}$$

Considérant les moments par rapport à l'endroit où la main droite tient une partie de la découpeuse (point D, il faut qu'à l'équilibre, la sommation des moments soit nulle ($\Sigma M_D = 0$); ce que l'on peut exprimer de la façon suivante:

$$163 \times .38 + (F_{2H} - F_{2CH}) \times 0.036 - (F_{2CV} + F_{2V}) \times 0.774 = 0$$

$$61.94 + (0.707F_2 - 35) \times 0.036 - (35 + 0.707F_2) \times 0.774 = 0$$

$$\text{d'où } F_2 \simeq 64 \text{ N et } F_{2H} = F_{2V} \simeq 45 \text{ N } (\sim 10 \text{ lb})$$

il faut également que la sommation ΣF horizontales soit égale à zéro; par conséquent:

$$F_{2CH} - F_{2H} - F_{2DH} = 0$$

$$35 - 45 - F_{2DH} = 0 \rightarrow F_{2DH} \simeq + 10 \text{ N } (\sim 2 \text{ lb})$$

Dans ce cas, l'opérateur doit exercer une légère force horizontale en direction de l'objet à couper. De même, il faut également que ΣF verticale = 0

$$F_{2CV} + F_{2DV} + F_{2V} - F_M = 0$$

$$35 + F_{2DV} + 45.0 - 163 = 0 \text{ d'où } F_{2DV} \simeq 83 \text{ N } (\sim 18.5 \text{ lb})$$

En résumé, les forces requises par l'opérateur pour maintenir en position de coupe la découpeuse sont, dans ce scénario, faibles par rapport au poids de la découpeuse:

$$F_{2DH} \approx 10 \text{ N}, F_{2DV} \simeq 83 \text{ N} \text{ et } F_{2G} = 0 \text{ (par hypothèse)}$$

Par conséquent, selon les hypothèses applicables à ce scénario, les conditions de coupe sont sécuritaires s'il n'y a pas coincement ou déformation latérale du disque.

CAS NO. 3: (COUPE FRONTALE)

Ce cas de coupe occasionnelle avec la partie frontale du disque est illustré à la figure 5.5.

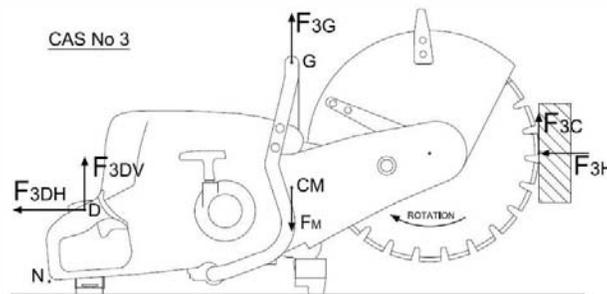


Figure 5.5 Schéma illustrant le cas d'une coupe où c'est l'avant du disque qui est en contact avec l'objet à couper.

Pour couper avec la partie frontale du disque, l'opérateur doit s'approcher en portant la découpeuse avec ses deux mains, principalement avec sa main gauche qui se situe au-dessus du centre de masse de l'appareil; la force exercée par l'opérateur F_{3G} est donc significative.

Lorsque le disque de la découpeuse s'engage dans l'objet à couper (par exemple, un tuyau), une force de coupe est générée vers le haut sur la partie frontale du disque; cette force F_{3C} peut s'exprimer comme suit si la découpeuse opère à pleine puissance:

$$F_{3C} = \frac{C}{r} = \frac{9.85 \text{ N.m}}{0.2 \text{ m}} \approx 49 \text{ N (ou } \sim 11 \text{ lb)}$$

Scénario 3.1 ($F_{3V} = 0$)

Selon ce scénario, la partie frontale du disque de la découpeuse n'est pas appuyée sur la surface de coupe; il y a seulement une force de coupe (F_{3C}) exercée sur les côtés de la partie diamantée du disque, sans composante horizontale ou frontale, l'opérateur doit maintenir la découpeuse avec ses deux mains, principalement avec sa main gauche. À l'équilibre, on aura:

$\Sigma F_V = 0$; $\Sigma F_H = 0$; $\Sigma M = 0$, comme dans ce scénario $F_{3V} = 0$ et $F_{3C} = 49\text{N}$ on aura:

ΣF horizontales implique que $F_{3H} = F_{3DH} = 0$

La sommation des moments par rapport au point D de la découpe doit être nulle ($\Sigma M_D = 0$), ou bien:

$$163 \times .38 - F_{3G} \times .38 - 49 \times .833 = 0$$

$$\text{d'où } F_{3G} \approx 56 \text{ N } (\sim 12 \text{ lb})$$

La sommation des forces verticales implique également que:

$$F_{3DV} + F_{3G} + F_{3C} - F_M = 0$$

$$F_{3DV} + 56 + 49 - 163 = 0, \text{ d'où } F_{3DV} \simeq 58 \text{ N}$$

Ce scénario nous apparaît exigeant pour l'opérateur car il doit porter une partie du poids de la découpeuse avec sa main gauche (56 N ou ~ 12 lb); de plus, la coupe s'exerce uniquement sur les parois latérales du disque ($F_{3V} = 0$).

Rappelons que ce scénario n'est pas recommandé par le fabricant Stihl.

Scénario 3.2 ($F_{3G} = 0$)

Sous l'effet de la force de coupe F_{3C} , l'opérateur doit soutenir la découpeuse avec ses deux mains; il n'exerce cependant pas de force avec sa main gauche.

À l'équilibre, il faut que: $\Sigma F_{\text{horizontales}} = \Sigma F_{\text{verticales}} = 0$ et $\Sigma M = 0$

Comme dans les autres scénarios $F_{3C} \simeq 49 \text{ N}$

Cependant, $F_{3G} = 0$, par hypothèse.

La sommation des moments par rapport au point D implique que:

$$\Sigma M_D = .38 \times F_M - F_{3C} \times .833 - F_{3H} \times .105 = 0$$

$$\text{d'où } F_{3H} \simeq 200 \text{ N } (\sim 45 \text{ lb})$$

La sommation des forces horizontales doit aussi être égale à zéro:

$$\Sigma F_{\text{horizontales}} = 0 \quad F_{3DH} = F_{3H} = 0 \text{ d'où } F_{3DH} \simeq 200 \text{ N}$$

De même, la sommation des forces verticales doit aussi être égale à zéro:

$$\Sigma F_{\text{verticales}} = 0 \quad F_M - F_{3DV} - F_{3C} = 0 \rightarrow F_{3DV} \simeq 114 \text{ N } (\sim 26 \text{ lb})$$

Ce scénario nous apparaît très peu viable car l'opérateur doit exercer, avec sa main droite, une force à la fois sur le plan horizontal ($F_{3DH} \simeq 200 \text{ N}$) et sur le plan vertical ($F_{3DV} \simeq 114 \text{ N}$), alors que la main gauche n'est pratiquement pas sollicitée. Il s'agit donc d'une condition de travail très inconfortable, très difficile et peu réaliste; elle n'est d'ailleurs pas recommandée par le manufacturier Stihl. De plus, même un léger coincement du disque pourrait générer un déséquilibre et la perte de contrôle de la découpeuse.

5.3. Évaluation des forces et énergies générées lors d'un coincement partiel du disque

Dans les paragraphes qui suivent, nous évaluerons les forces sur la découpeuse et les formes d'énergies qui peuvent être impliquées lors d'un coincement plus ou moins sévère du disque.

On supposera que pendant cet éventuel coincement, une partie de l'énergie cinétique de rotation du disque, maximale au départ (4600 rpm), est dissipée en chaleur ou perdue par abrasion et que les forces générées par le coincement sont telles que l'opérateur ne pourra retenir la découpeuse à sa position de coupe.

On supposera également que pendant le coincement, l'énergie cinétique du moteur de la découpeuse n'est pas transmise au disque à cause de la présence d'une courroie et de l'embrayage centrifuge qui, selon le manufacturier Stihl, devient effectif seulement lorsque la vitesse du moteur est supérieure à 3200 tours/minute.

On supposera aussi que la décélération du disque est constante ($\alpha_{\text{disque}} = Cte$) pendant le coincement et que le couple de freinage attribuable au coincement crée une force réactive (F_r) qui tend à projeter la découpeuse dans la direction de ce vecteur force.

Finalement, on supposera que le temps de coincement se situe entre 0,1 seconde et 0,2 seconde.

Nous examinerons différents cas de coincement plus ou moins sévères et évaluerons les forces générées et les quantités d'énergies impliquées dans chaque situation.

CAS C1: Hypothèse: la vitesse de rotation du disque passe brusquement de 4600 rpm (482 radians/sec) à 3200 rpm (335 radians/sec).

Dans ce cas, l'énergie cinétique de rotation du disque (E_{co}) avant qu'il y ait freinage est grande; elle peut être exprimée par la relation

$$E_{co} = \frac{1}{2} J \ell \omega^2$$

Où $J \ell$ est le moment d'inertie du disque et ω est sa vitesse angulaire (radians/sec).

Le disque possède une masse de 2.5 kilos, un rayon de 200 millimètres et une épaisseur moyenne de 2.5 millimètres; son moment d'inertie $J\ell$ est d'environ 0.05 kg.m^2 . Connaissant ces données, on peut évaluer l'énergie cinétique initiale du disque:

$$E_{co} = \frac{1}{2} \times 0.05 \times (482)^2 \approx 5808 \text{ Joules}$$

Si le temps de coincement ou de freinage brusque du disque est d'environ 0.1 seconde, alors le couple de freinage du disque sera égal à:

$$C_{f \text{ disque}} \approx J\ell \times \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \approx 0.05 \times \frac{335 - 482}{0.1 \text{ sec.}} \approx -73 \text{ Newtons-mètres}$$

Ce couple sera d'environ 37 Newtons-mètres si $\Delta t = 0.2$ seconde.

La force réactive générée par ce couple sera égale à:

$$Fr_{(0.1 \text{ sec.})} = \frac{C_{f \text{ disque}}}{\text{Rayon du disque}} = \frac{73}{0.2 \text{ m}} = 365 \text{ Newtons } (\sim 88 \text{ lb})$$

Cette force réactive sera d'environ 182 Newtons si $\Delta t = 0.2$ sec.

Rappelons que cette force réactive est soudaine et ne pourra fort probablement pas être compensée par l'opérateur dont le temps de réaction normal (de l'ordre d'une seconde) est insuffisant. La découpeuse aura tendance à se déplacer (avancer et/ou tourner) sous l'effet de cette force réactive appliquée pendant une courte période de temps (entre 0.1 et 0.2 seconde), selon nos hypothèses.

Si, par exemple, la zone de coincement se situe au bas du disque, alors la force réactive sera tangente au rayon du disque (c.a.d. horizontale si l'axe longitudinal de la découpeuse est lui-même à l'horizontale).

Si la zone de coincement se situe à environ 45 degrés par rapport au bas du disque, la force réactive sera également tangente au rayon du disque à l'endroit où le coincement s'effectue. La découpeuse sera alors projetée vers l'avant et le haut. Comme la force réactive (F_r) s'exerce dans la partie avant de la découpeuse, relativement loin de son centre de masse, cette force aura pour effet de faire tourner la découpeuse dans le sens contraire de la rotation du disque.

La force réactive (F_r) générée pendant le coincement induira une accélération de la découpeuse selon la 2^{ième} loi de Newton:

$$F = ma$$

Si $t = 0.1 \text{ sec.}$, $F_r = 365 \text{ N}$,

par conséquent, l'accélération « a » de la découpeuse sera:

$$a_{(0.1 \text{ sec.})} = \frac{F_r}{m} = \frac{365}{16.6} \approx 22 \text{ m/sec}^2$$

La vitesse atteinte par la découpeuse après 0.2 sec. sera:

$$V_{(0.1 \text{ sec.})} = V_0 + at = 0 + 22 \times 0.1 \approx 2.2 \text{ m/sec}$$

Si le temps de coincement est de 0.2 sec., on aura alors:

$$a_{(0.2 \text{ sec.})} = \frac{182 \text{ N}}{16.6 \text{ kg}} \approx 11 \text{ m/sec.}^2$$

et la vitesse atteinte par la découpeuse après 0.2 seconde sera:

$$V_{(0.2 \text{ sec.})} = 0 + 11 \times 0.2 \text{ sec.} \approx 2.2 \text{ m/sec.}^2,$$

soit la même vitesse finale que dans le cas précédent.

L'énergie cinétique ainsi emmagasiné dans la découpeuse à la sortie du coincement sera:

$$E_c \text{ découpeuse} = \frac{1}{2} mV^2 \simeq \frac{1}{2} \times 16.6 \times (2.2)^2 \simeq 40 \text{ Joules}$$

Cette énergie cinétique est relativement faible mais suffisante pour projeter la scie à certaine hauteur; elle est quasi suffisante pour soulever la découpeuse à une hauteur d'environ 25 centimètres.

Soulignons que si le temps de coincement du disque est d'environ 0.1 seconde, il générera une décélération angulaire moyenne α de cette dernière égale à :

$$\alpha_{(0.1 \text{ sec.})} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{335 - 482}{0.1 \text{ sec}} = - 1470 \text{ rad/sec.}^2$$

On aura également, au cours de cette décélération, une diminution de la vitesse angulaire ω du disque qui s'exprimera par la relation:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

et une révolution angulaire du disque pendant le temps de coincement égale à:

$$\Theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$\Theta = 482 \times 0.1 - \frac{1}{2} \times 1470 \times (0.1)^2 \simeq 41 \text{ radians } (\sim 6.5 \text{ tours})$$

et l'énergie dépensée (w) pendant le coincement sera égale à :

$$W = \text{Couple de freinage} \times \vartheta$$

$$W = 365 \times 0.2 \times 41 \cong 3000 \text{ Joules}$$

soit environ 50% de l'énergie cinétique initiale du disque (5808 Joules).

Si le temps de coincement est d'environ 0.2 secondes, on obtient alors

$$\alpha_{(0.2 \text{ sec.})} = \frac{335-482}{0.2} = 735 \text{ rad/sec.}^2$$

$$\vartheta = 482 \times 0.2 - \frac{1}{2} \times 735 \times (0.2)^2 \simeq 82 \text{ radians } (\sim 13 \text{ tours})$$

et

$$W = 37 \times 82 \simeq 3000 \text{ Joules}$$

soit pratiquement la même quantité que dans le cas où le freinage est de 0.1 seconde (\pm les erreurs de calculs).

Comme la force de freinage s'applique au pourtour du disque, dépendant de l'angle et de sa position par rapport au centre de masse de la découpeuse, un moment tournant sera généré qui ne pourra fort probablement pas être compensé par l'opérateur.

Le disque va continuer à tourner pendant le coinçage et le point de contact pourra se déplacer notamment sous l'effet de la force réactive. Il pourra donc se produire des conditions dynamiques susceptibles de faire tourner la découpeuse et l'éloigner ou la rapprocher de l'opérateur.

Soulignons que le couple favorisant la rotation de la découpeuse sera particulièrement important si le coincement est violent et qu'il a lieu près de la partie frontale du disque.

CAS C2: Hypothèse: La vitesse du disque passe brusquement de 4600 rpm (482 rad/sec.) à 1000 rpm (105 rad/sec).

En suivant la même démarche que le cas précédent, on obtient les valeurs suivantes:

$$E_{cli} \simeq \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} c 0.05 \times 482^2 = 5808 \text{ Joules}$$

$$E_{clt} \simeq \frac{1}{2} \times 0.05 \times 105^2 = 276 \text{ Joules}$$

Perte d'énergie cinétique du disque $\Delta E_{cl} \cong 5530 \text{ Joules}$

$$C_{tl} \simeq J \ell \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

Si $\Delta t = 0.1$ seconde, alors:

$$C_{tl (0.1 \text{ sec.})} = 0.05 \times \frac{(105 - 482)}{0.1} = -188 \text{ Newtons-mètres}$$

Si $\Delta t = 0.2$ seconde, alors:

$$C_{tl (0.2 \text{ sec.})} = 0.05 \times \frac{(105 - 482)}{0.2} = -94 \text{ Newtons-mètres}$$

Ce couple de freinage générera une force réactive (F_r) sur le disque qui sera fonction du temps de coincement; on aura:

$$F_{r(0.1 \text{ sec.})} = \frac{C_{tl(0.1 \text{ sec.})}}{\text{Rayon du disque}} = \frac{-188}{0.2 \text{ m}} \simeq 940 \text{ N } (\sim 211 \text{ lb})$$

$$F_{r(0.2 \text{ sec.})} = \frac{C_{tl(0.2 \text{ sec.})}}{\text{Rayon du disque}} = \frac{-94}{0.2 \text{ m}} \simeq 470 \text{ N } (\sim 106 \text{ lb})$$

Dans les deux hypothèses en regard du temps de coincement, la force réactive soudaine et élevée ne pourra être compensée par l'opérateur; ce dernier ne pourra retenir la découpeuse à sa position d'avant coincement.

Dépendant de la région de contact ou coincement du disque, la force réactive peut prendre différentes directions. Si, par exemple, la zone de coincement se situe au bas du disque, alors la force réactive sera tangente au rayon du disque et orientée horizontalement vers l'avant de la découpeuse. Si le coincement se situe à l'avant de l'axe longitudinal de la découpeuse, alors la force réactive s'exercera vers le haut, perpendiculairement au rayon de contact ou de coincement de la machine. Dans cette dernière hypothèse, considérant que la force réactive s'exercera complètement à l'avant, loin du centre de masse de la découpeuse, cette dernière aura tendance à tourner dans le sens contraire de celui du disque, possiblement dans la direction de l'opérateur.

La force réactive induira une accélération «a» de la découpeuse pendant le temps de coincement; cette accélération, peut être exprimée par l'équation $F = ma$, ou bien:

$$a_{\text{découpeuse}} = \frac{F_r}{\text{Masse de la découpeuse}}$$

$$\text{Si } F_{r(0.1 \text{ sec.})} = 940 \text{ N} \quad \text{alors } a = \frac{940}{16.6} = 57 \text{ m/sec.}^2$$

et la vitesse atteinte par la découpeuse après 0.1 sec. sera:

$$V_{(0,1 \text{ sec.})} = V_0 + at$$

$$V_{(0,1 \text{ sec.})} = 0 + \frac{57 \text{ m}}{\text{sec.}^2} \times 0.1 \text{ sec.} = 5.7 \text{ m/sec.}$$

$$\text{Si } Fr_{(0,2 \text{ sec.})} = 470 \text{ N} \quad \text{alors } a = \frac{470}{16.6} = 28.5 \text{ m/sec.}^2$$

et la vitesse atteinte par la découpeuse après 0.2 sec. sera:

$$V_{(0,2 \text{ sec.})} = 0 + \frac{28.5}{\text{sec.}^2} \times 0.2 \text{ sec.} = 5.7 \text{ m/sec.}$$

soit la même que celle susmentionnée pour un temps de coincement de 0.1 seconde.

L'énergie cinétique (Ecd) emmagasinée par la découpeuse sous l'effet de la force réactive sera:

$$E_{cd(0,1 \text{ sec.})} = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} \times 16.6 \times (5.7)^2 \simeq 270 \text{ Joules}$$

Cette énergie cinétique emmagasinée par la découpeuse sera la même si le temps de freinage est de 0.2 seconde, soit environ 270 Joules.

Cette énergie cinétique relativement modeste sera suffisante pour soulever la découpeuse à plus d'un mètre et demi de hauteur si la composante principale de la force Fr est verticale.

Considérant que la force réactive est élevée par rapport au poids de la découpeuse et que cette force s'exerce dans la partie avant de la machine, loin de son centre de masse, cette dernière pourra avoir tendance à tourner sur elle-même dans le sens antihoraire, c'est-à-dire en direction de l'opérateur.

On peut également évaluer la décélération du disque pour différents temps de coincement:

Si $\Delta t = 0.1$ sec.

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \text{ et } \alpha = \frac{105-482}{0.1} = -3770 \text{ rad/sec.}^2$$

$$\Theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 = 482 \times 0.1 - \frac{1}{2} \times 3770 \times (0.1)^2 \simeq 29 \text{ rad. } (\sim 5 \text{ tours})$$

Si $\Delta t = 0.2$ sec.

$$\alpha = \frac{105-482}{0.2} = 1885 \text{ m/sec.}^2$$

$$\Theta_{(0.2 \text{ sec.})} = 482 \times 0.2 - \frac{1}{2} \times 1885 \times (0.2)^2 = 59 \text{ rad. } (\sim 9 \text{ tours})$$

L'énergie dépensée pendant le freinage de la lame (W) sera égale à:

$$W = \text{couple de freinage } C_{fl} \times \Theta$$

$$W_{(0.1 \text{ sec.})} = 188 \times 29 = 5500 \text{ Joules}$$

$$W_{(0.2 \text{ sec.})} = 94 \times 59 \simeq 5500 \text{ Joules}$$

soit environ 95% de l'énergie cinétique initiale du disque.

CAS NO. C3: Hypothèse: la vitesse du disque passe brusquement de 4600 rpm (482 rad/sec.) à zéro (arrêt complet).

En utilisant la même méthode de calcul que précédemment, on aura:

$$E_{c,ci} = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 482^2 = 5808 \text{ Joules}$$

$$E_{c,cf} = 0$$

$$C_{t,f} = J_t \times \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{0.05 \times 482}{\Delta t}$$

si $\Delta t = 0.1 \text{ sec.}$ alors $C_{t,f(0.1 \text{ sec.})} \simeq 241 \text{ Newtons-mètres}$

si $\Delta t = 0.2 \text{ sec.}$ alors $C_{t,f(0.2 \text{ sec.})} \simeq 120 \text{ Newtons-mètres}$

Si toute l'énergie cinétique du disque est perdue lors du coincement, alors:

$$Fr_{(0.1 \text{ sec.})} = \frac{\text{couple de freinage}}{\text{rayon du disque}} = \frac{241}{0.2 \text{ m}} \simeq 1205 \text{ Newtons (~270 lb)}$$

$$Fr_{(0.2 \text{ sec.})} = \frac{120.5}{0.2 \text{ m}} \simeq 602 \text{ Newtons (~135 lb)}$$

La décélération moyenne du disque sera:

$$\alpha_{(0.1 \text{ sec.})} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \simeq \frac{482}{0.1 \text{ sec.}} = 4820 \text{ radiants/sec.}^2$$

$$\alpha_{(0.2 \text{ sec.})} = \simeq \frac{482}{0.2 \text{ sec.}} = 2410 \text{ radiants/sec.}^2$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

$$\vartheta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$\vartheta_{(0.1 \text{ sec.})} = 482 \times 0.1 - \frac{1}{2} \times 4820 \times 0.1^2 \simeq 24 \text{ rad (~ 3.8 tours)}$$

$$\vartheta_{(0.2 \text{ sec.})} = 482 \times 0.2 - \frac{1}{2} \times 2410 \times 0.2^2 \simeq 48 \text{ rad (~ 7.7 tours)}$$

$W = \text{couple de freinage} \times \varnothing$

$$W_{0.1 \text{ sec.}} = 241 \times 24 = 5800 \text{ Joules}$$

$$W_{0.2 \text{ sec.}} = 120 \times 48 = 5800 \text{ Joules}$$

Dans ce cas particulier, toute l'énergie cinétique du disque est perdue au cours du freinage brusque ou du coincement et ce, en supposant notamment que la découpeuse demeure à sa position initiale de coupe.

En réalité, la très importante force réactive ne pourra être compensée par l'opérateur et la découpeuse ne pourra demeurer en place; elle s'accélérera selon la 2^{ième} loi de Newton:

$$F = m \cdot a \quad a = \frac{F}{m}$$

$$a_{\text{découpeuse}} (0.1 \text{ sec.}) = \frac{1205}{16.6} \simeq 72 \text{ m/sec.}^2$$

$$a_{\text{découpeuse}} (0.2 \text{ sec.}) = \frac{602}{16.6} \simeq 36 \text{ m/sec.}^2$$

$$V = V_0 + a \times t$$

$$V_{(0.1 \text{ sec.})} = 0 + 72 \cdot 0.1 \text{ sec.} = 7.2 \text{ m/sec.}$$

$$V_{(0.2 \text{ sec.})} = 0 + 36 \cdot 0.2 \text{ sec.} = 7.2 \text{ m/sec.}$$

$$E_{\text{Cdécoupeuse}} (t = 0.1 \text{ sec.}) = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \times 16.6 \times (7.2)^2 \simeq 400 \text{ Joules}$$

$$E_{\text{Cdécoupeuse}} (t = 0.2 \text{ sec.}) = \frac{1}{2} \times 16.6 \times (7.2)^2 \simeq 400 \text{ Joules}$$

Cette énergie emmagasinée par la découpeuse lors du coincement est considérable; elle est suffisante pour soulever la découpeuse à une hauteur d'environ 2 mètres et demi, si elle est utilisée à cette fin.

Note: dans les calculs susmentionnés, on a, dans un premier temps, supposé que toute l'énergie cinétique du disque était perdue pendant le coincement et que la découpeuse demeurait à sa position initiale.

Dans un deuxième temps, on a supposé que l'opérateur ne pouvait maintenir à sa position de travail la découpeuse et que cette dernière acquerra une petite partie de l'énergie cinétique initiale du disque et se déplacera.

En principe, on aurait dû respecter la première loi de thermodynamique et considérer que:

$$E_{C\text{initiale du disque}} = E_{\text{perdue lors du coincement}} + E_{\text{acquise par la découpeuse}} + E_{C\text{ résiduelle du disque}}$$

Selon cette dernière équation, l'énergie perdue lors du coincement du disque sera plus faible que celle évaluée en considérant que la découpeuse demeure en position de travail (~ 10% plus faible dans le présent cas).

5.4. Moment tournant exercé sur la découpeuse lors d'un coincement partiel du disque

Le moment tournant exercé sur la découpeuse lors d'un coincement est principalement fonction de la décélération du disque et de l'endroit où se produit ce coincement.

Ce moment peut être exprimé par rapport au point N (au bas de la poignée arrière de la machine) et peut être calculé en supposant:

- i) que l'opérateur n'exerce aucune force de retenue lors du coincement rapide du disque ($F_G = F_{DH} = F_{DV} = 0$);
- ii) que seules la force réactive et le poids de la découpeuse sont considérés;
- iii) que les différentes hypothèses concernant la position du point de coincement (90°, 45°, frontal) sont les mêmes que celles déjà décrites précédemment.

Si le point de coincement se situe à 90° (point F₁), la découpeuse aura surtout tendance à se déplacer horizontalement sous l'effet de la force réactive Fr. Le moment tournant (M_N) exercé sur la découpeuse au point N pourra être exprimé de la façon suivante:

$$M_N = F_M \times .445 - Fr \times .036$$

Ce moment sera relativement petit et positif (dans le sens horaire) car, dans ce cas, la force réactive Fr s'applique à une faible hauteur par rapport au point N, et il n'y a pas de risque de cabrage de la découpeuse.

Voici les détails des calculs des moments tournants (M_N) pour chacun des cas de coincements à 90 degrés étudiés:

Cas C1.1	$M_N = 72.5 - 365 \times 0.036 \simeq$	+ 59 Newtons-mètres
C1.2	$72.5 - 182 \times 0.036 \simeq$	+66 Newtons-mètres
C2.1	$72.5 - 940 \times 0.036 \simeq$	+39 Newtons-mètres
C2.2	$72.5 - 470 \times 0.036 \simeq$	+56 Newtons-mètres
C3.1	$72.5 - 1205 \times 0.036 \simeq$	+29 Newtons-mètres
C3.2	$72.5 - 602 \times 0.036 \simeq$	+51 Newtons-mètres

Comme tous ces moments tournants sont positifs, il n'y a pas de risque que la découpeuse tourne en direction de l'opérateur.

Si le point de coincement se situe à 45 degrés (point F₂), la découpeuse aura tendance à avancer et à monter ou tourner au-dessus de la zone de coupe. Pour les cas étudiés, les moments tournants (M_N) calculés par rapport au point N sont les suivants:

Cas C1.1	M _N = 72.5 - 365 x ~0.5 ≈	-110 Newtons-mètres
C1.2	= 72.5 - 182 x ~0.5 ≈	-18.5 Newtons-mètres
C2.1	= 72.5 - 940 x ~0.5 ≈	-397 Newtons-mètres
C2.2	= 72.5 - 470 x ~0.5 ≈	-162 Newtons-mètres
C3.1	= 72.5 - 1205 x ~0.5 ≈	-530 Newtons-mètres
C3.2	= 72.5 - 602 x ~0.5 ≈	-228 Newtons-mètres

À l'exception du cas C1.2, les moments calculés pourront très difficilement être compensés par l'opérateur. Il y aura donc risque de cabrage ou de perte de contrôle de la découpeuse.

Si le point de coincement se situe complètement à l'avant du disque (point F₃) la découpeuse aura tendance à monter au-dessus de la zone de coupe et probablement à tourner autour d'un point de repère se situant au bas de la poignée arrière (point N sur les schémas).

Pour cette situation, on aura:

$$M_N = F_M \times .445 - F_{3r} \times 0.9 \text{ mètres}$$

En utilisant les valeurs de F_{3r} déjà calculées, on obtient les moments suivants:

Cas C1.1	$M_N = 72.5 \cdot 365 \times 0.9$	\simeq	-256 Newtons-mètres
C1.2	$72.5 - 182 \times 0.9$	\simeq	-91 Newtons-mètres
C2.1	$72.5 - 940 \times 0.9$	\simeq	-773 Newtons-mètres
C2.2	$72.5 - 470 \times 0.9$	\simeq	-350 Newtons-mètres
C3.1	$72.5 - 1205 \times 0.9$	\simeq	-1012 Newtons-mètres
C3.2	$72.5 - 602 \times 0.9$	\simeq	-469 Newtons-mètres

D'après ces calculs, on peut en déduire que les cas les plus dangereux sont ceux où le disque coince brutalement dans sa partie la plus en avant (partie frontale). Dans cette situation, même un coincement partiel et relativement lent (~ 0.2 sec.) générera un moment tournant sur la découpeuse qui dépassera la capacité de réaction de l'opérateur et pourra conduire à une perte de contrôle de la machine.

Dans les pires scénarios, la découpeuse tournera rapidement dans le sens antihoraire en direction de l'opérateur.

5.5. Rotation probable de la découpeuse lors d'un coincement du disque

On peut évaluer la vitesse et l'angle de rotation de la découpeuse sous l'effet des moments tournants calculés précédemment.

On utilisera les équations d'un mouvement angulaire à accélération ou décélération constante, de même que l'équation qui relie le couple net appliqué sur la découpeuse (τ_{net}) à l'accélération angulaire α :

$$\alpha_{\text{découpeuse}} = \frac{\tau_{net}}{I_{\text{découpeuse}}}$$

On supposera que la rotation s'effectue à partir d'une rotule à l'arrière de la poignée de la machine (point N) et que le moment d'inertie de la découpeuse (I_{dn}) par rapport au point N est de l'ordre de 3.5 kg.m^2 . On considérera que le couple de rotation net appliqué sur la découpeuse par rapport au point N est généré par la force de réaction F_r et par le poids de la machine. On aura:

$I_{dn} \simeq 3.5 \text{ kg.m}^2$ et τ_{net} égale à chacun des moments tournants nets calculés précédemment par rapport au point N.

On fera les calculs de rotations pour les cas intermédiaires (C2.1 et C2.2, où le disque freine ou coince partiellement pendant que la zone de coupe se situe à environ 45 degrés par rapport à l'horizontale.

Pour le cas C2.1, où $t = 0.1$ seconde et $\tau_{net} = 397$ Newtons-mètres, on aura:

$$\alpha_{\text{découpeuse}} = \frac{397}{3.5} \approx 113 \text{ rad/sec.}^2 \sim \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

$$\Delta\omega \approx 113 \times 0.1 \text{ sec.} \approx 11 \text{ rad/sec.} (\sim 2 \text{ tours/sec.})$$

ou bien

$$\omega_{0.1 \text{ sec.}} = \omega_0 + \alpha t = 0 + 113 \times 0.1 \text{ sec.} \approx 11 \text{ rad/sec.}$$

La rotation angulaire (θ) parcourue par la découpeuse pendant le coïncement sera:

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 = 0 + \frac{1}{2} \times 113 \times (.1)^2 \approx 0.6 \text{ rad} (\sim 0.1 \text{ tour})$$

Pour le cas 2.2, où $t = 0.2$ seconde, on aura:

$$\alpha_{\text{découpeuse}} = \frac{162}{3.5} \approx 46 \text{ rad/sec.}^2$$

$$\alpha_{\text{découpeuse}} = \frac{\Delta\omega}{0.2 \text{ sec.}} = 46 \rightarrow \Delta\omega \approx 9 \text{ rad/sec.}$$

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 = 0 + \frac{1}{2} \times 46 \times (0.2)^2 = 0.9 \text{ rad} (\sim 0.15 \text{ tour})$$

Ces deux derniers cas représentent bien la situation lors d'un coïncement particulièrement dangereux où la découpeuse peut tourner brusquement, pendant ce freinage, d'environ un quart de tour et possiblement se diriger vers la partie supérieure du corps de l'opérateur.

On a également effectué les calculs de rotation de la découpeuse pour les cas C3.1 et C3.2. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.2; ils sont du même ordre de grandeur que ceux susmentionnés.

5.6. Résumé des calculs effectués

Les résultats des six scénarios de coupe avec la découpeuse concernée sont présentés dans les tableaux 5.1 et 5.2.

À l'exception des scénarios nos. 3.1 et 3.2 impliquant des coupes frontales qui ne sont pas recommandées par le manufacturier Stihl, on note que les forces que doit exercer l'opérateur lors de coupes normales avec appui du disque sur l'objet à couper sont raisonnables (généralement moins de 90 Newtons (~20 lbf) et bien inférieure au poids de la découpeuse.

Cependant, lors d'un coincement du disque, la situation est très différente. La force réactive qui peut alors être générée au cours du coincement peut atteindre les 1200 Newtons (voir tableau 5.2). Dans presque toutes les hypothèses réalistes de coincement étudiées, les forces nécessaires pour maintenir la découpeuse à sa position d'avant coincement sont trop grandes pour que l'opérateur ait le temps et l'énergie suffisants pour réagir correctement. Il y aura donc une perte de contrôle de la découpeuse, partielle ou totale selon la sévérité du coincement

Tableau 5.1: Résumé des forces exercées sur les mains de l'opérateur selon six scénarios différents (sans coincement)

	Scénarios					
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
HYPOTHÈSES						
Angle de coupe	90	90	45	45	Frontale	Frontale
Force verticale appliquée sur le disque, F_v	0	?	0	?	0	?
Force verticale exercée par l'opérateur, F_G	?	0	?	0	?	0
FORCES CALCULÉES ET EXERCÉES PAR L'OPÉRATEUR						
F_G (Newtons)	151	0	88	0	56	0
F_{Dv} (Newtons)	12	73	40	83	58	114
F_{Dh} (Newtons)	49	49	35	10	0	200
<p>Note: On a supposé que la découpeuse opérait à la pleine puissance utile pour chacun des six scénarios.</p> <p>Les scénarios 3.1 et 3.2 ne sont pas recommandés par le manufacturier Stihl; ils sont susceptibles de générer des situations dangereuses notamment lorsque le disque coince en cours de coupe.</p> <p>1 Newton = 0.225 lbf</p>						

Tableau 5.2: Résumé des calculs effectués selon différentes hypothèses de coincement du disque de la découpeuse

	<u>Scénarios</u>					
	C1		C2		C3	
	T = .1 sec.	T = .2 sec.	T = .1 sec.	T = .2 sec.	T = .1 sec.	T = .2 sec.
Hypothèses de coincement						
Vitesse initiale du disque (rad/sec.)	482	482	482	482	482	482
Vitesse du disque après coincement (rad/sec.)	335	335	105	105	0	0
Valeurs Calculées						
Énergie cinétique initiale du disque (Joules)	5008	5008	5008	5008	5008	5008
Énergie cinétique du disque après coincement (Joules)	2800	2800	276	276	0	0
Taux de décélération du disque (rad/sec.)	1470	735	3770	1885	4820	2410
Couple de freinage du disque (Newtons-mètres)	73	37	188	94	241	120
Force réactive générée par le freinage brusque du disque (N)	365	182	940	470	1205	602
Moment tournant (M _{ix}) exercé sur la découpeuse pendant le coincement (Newtons-mètres)						
Si coupe à 90°	59	66	39	56	29	51
Si coupe à 45°	110	18	397	162	530	228
Si coupe frontale	256	91	773	350	1012	469
Énergie emmagasinée par la découpeuse (Joules)	40	40	270	270	400	400
Énergie dépensée pendant le freinage (Joules)	3000	3000	5500	5500	5800	5800
Rotation du disque pendant le temps de freinage (radiants)	41	82	29	59	24	48
Angle de rotation de la découpeuse pendant le freinage (radiants)			0.6	0.9	1.4	2.7
(Voir notes page suivante)						

Notes: On a supposé que seulement l'énergie cinétique initiale de rotation du disque était dépensée lors du coincement et du déplacement de la découpeuse.

On a également supposé que pendant le coincement, l'opérateur n'a pas le temps de réagir, que les forces exercées par ce dernier étaient momentanément nulles

$$(F_G = F_{DH} = F_{DV} = 0)$$

On a aussi émis l'hypothèse que la décélération du disque était constante pendant toute la durée du coincement et que par conséquent, ce disque demeurait dans le trait de scie pendant le freinage.

Les hypothèses de temps de coincement de 0.1 et 0.2 seconde sont les mêmes que celles utilisées par l'ingénieur Jean Ruel dans son rapport de décembre 2006.

Au cours de nos calculs, on a notamment fait l'hypothèse que la découpeuse était initialement en position horizontale.

On a fait l'hypothèse que lors du coincement, l'énergie cinétique de rotation du moteur de la découpeuse ne contribuait pas au bilan d'énergie. Si on avait considéré cette dernière énergie, on aurait obtenu des amplitudes de forces et de couples plus grandes que celles calculées.

À nos avis, si lors d'un coincement les moments tournants exercés sur la découpeuse sont supérieurs à environ 100 Newtons-mètres, il y a un risque élevé de perte de contrôle de la machine. Dans pratiquement tous les cas de coincement étudiés, où le disque coupe sous un angle de 45 degrés ou dans sa partie frontale (CAS C2 et C3), des moments tournants bien supérieurs à 100 Newtons-mètres peuvent être anticipés.

1 Newton-mètre \approx 0.74 lbf. pied

6. SOMMAIRE

L'information qui nous a été transmise, de même que notre propre analyse technique des forces et énergies pouvant être générées lors d'un coincement partiel du disque de la découpeuse concernée dans l'accident du 1er septembre 2015, nous ont permis de mettre en lumière les éléments suivants:

- La découpeuse Stihl impliquée dans l'accident nous est apparue en bon état général. Cependant, le disque diamantée (grade B10) n'était pas approuvée pour la coupe de la fonte ductile. De plus, les segments de coupe étaient légèrement encrassés ou glacés («glazed»), ce qui pouvait diminuer leur efficacité de coupe.

- L'accident est survenu vers la toute fin de la deuxième coupe d'une section de tuyau en fonte; cette coupe était effectuée à l'aide d'une découpeuse de marque Stihl, modèle TS800. Comme les deux parties du tuyau d'aqueduc concerné étaient solidement enfouies dans le sol et que la section à couper n'était pas retenu pendant le travail, cette section pouvait se déplacer légèrement vers la toute fin de la deuxième coupe et créer alors des conditions propices à un coincement partiel et/ou à un freinage brusque du disque de la découpeuse.
- La présence d'une bande de friction noire, en forme de spirale, observée sur un côté du disque après l'accident, est fort probablement associée à un tel coincement partiel et à l'énergie perdue pendant ce blocage ou freinage. Tel qu'expliqué dans le texte, une décélération rapide du disque de coupe lors d'un coincement ou freinage implique une importante force de réaction qui tend à déstabiliser la découpeuse et à générer, dans certaines situations, des moments tournants susceptibles d'entraîner un mouvement de rotation de la machine dans le sens contraire à celui du disque de coupe.
- Les calculs effectués ont montré que dans une situation normale de coupe, les forces que doit générer l'opérateur de la découpeuse sont d'amplitude acceptable. Cependant, s'il se produit un coincement partiel ou total du disque, ce coincement peut générer des couples plus ou moins importants tendant à faire avancer et/ou tourner la découpeuse.
- Les cas les plus dangereux considérés dans nos évaluations sont ceux d'une coupe avec la partie avant du disque, accompagnée d'un coincement partiel ou total du disque pendant une fraction de seconde (0.1 sec. ou 0.2 sec.). Les coincements du disque, sous un angle d'environ 45 degrés par rapport à l'horizontale, en profondeur de l'objet à couper, peuvent aussi générer des conditions dangereuses.

Dans pratiquement tous les cas de coincements étudiés, où la coupe est effectuée sous un angle $\sim 45^\circ$ ou à l'aide de la partie frontale du disque (cas C2 et C3), les énergies alors emmagasinées dans la découpeuse et les moments tournants pouvant être générés sont suffisamment importants pour déstabiliser la machine et créer des conditions à risques élevés pour l'opérateur.

- On a notamment évalué que dans les cas particuliers d'un coincement partiel du disque d'une durée de 0.1 ou 0.2 seconde, lors d'une coupe à 45 degrés au cours de laquelle la vitesse de rotation du disque passe brusquement de 4600 rpm (482 rad/sec.) à 1000 rpm (105 rad/sec), les valeurs suivantes décrivent bien les amplitudes des énergies, moments tournants et réactions de la découpeuse:

CAS C2.1 ET C2.2 (COUPES À 45°)	T = 0.1sec.	T = 0.2 sec.
Énergie initiale du disque (Joules)	~ 5808	~5808
Couple de freinage du disque pendant le coincement (Newtons-mètres)	~ 188	~ 94
Énergie cinétique emmagasinée par la découpeuse pendant le coincement (Joules)	~ 270	~270
Rotation du disque pendant le coincement (radiants)	~ 29 (5 tours)	~ 59 (9 tours)
Moment tournant exercé sur la découpeuse pendant le coincement (Newtons-mètres)	- 397	~ 162
Rotation angulaire de la découpeuse pendant le coincement (radiants)	~ 0.6 (~0.1 tour)	~ 0.9 (~0.15 tour)

- Ces deux derniers scénarios de coupe et de coincement partiel (C2.1 et C2.2), en une toute petite fraction de seconde, sont particulièrement compatibles avec la description de l'accident du 1er septembre 2015; ils sont, à notre avis, les plus pertinents parmi ceux analysés dans le présent document.

- Les cas susmentionnés illustrent bien le danger d'un brusque coincement, même partiel, de la partie avant du disque (approximation entre 45 et 135 degrés par rapport à l'horizontale). Selon les hypothèses réalistes posées pour effectuer les calculs, la découpeuse peut subitement tourner d'une fraction de tour sur elle-même, notamment en direction de la partie supérieure du corps de l'opérateur, lors d'une telle décélération rapide du disque de la machine.
- Dans le cas particulier de l'accident de septembre 2015, le disque était très fort probablement entrée profondément dans le trait de coupe alors que le segment de tuyau concerné n'était pratiquement plus retenu à ses extrémités par le long conduit d'aqueduc, ce qui créait des conditions propices au coincement ou freinage du disque de coupe pendant une fraction de seconde.

7. CONCLUSION

Considérant le contexte de l'accident du 1er septembre, l'information disponible, de même que nos propres observations et calculs, nous sommes d'avis que c'est un coincement partiel du disque de la découpeuse, en toute fin de coupe, alors que le segment de tuyau n'était plus fixé à ses extrémités et que le disque était profondément entré dans la fente de la deuxième coupe, qui constitue, sur le plan technique, le cœur de la chaîne de causalité qui a conduit à ce malheureux accident.

8. RECOMMANDATIONS

Considérant le contexte de l'accident du 1er septembre 2015, de même que celui d'autres accidents semblables survenus notamment au Québec, nous recommandons de toujours fixer solidement l'objet à découper de manière à ce que le trait de coupe demeure bien ouvert au cours du travail et ce, jusqu'à l'arrêt complet du disque de la découpeuse.

Il faut anticiper et éviter tout effet de coincement ou de resserrage qui pourrait freiner le disque. Rappelons qu'à la toute fin du travail, la découpeuse ne peut plus s'appuyer sur son disque et que l'opérateur doit alors reprendre tout le poids de la machine. Ces changements brusques de conditions d'opération et d'appui peuvent induire une perte de contrôle de la machine et être à l'origine d'un accident.

Considérant également les résultats de nos calculs, notamment lors d'un coincement partiel ou total du disque de coupe, nous recommandons aux utilisateurs de ne pas se servir de la partie avant du disque (entre approximativement 45 et 135 degrés par rapport à l'horizontale) d'une découpeuse identique ou semblable à celle impliquée dans le présent dossier, car un éventuel coincement du disque (même partiel) peut alors générer une perte de contrôle ou un rebond («kick-back») de la découpeuse, vers l'opérateur. Si, à cause des dimensions de la pièce à couper ou de sa localisation, il n'est pas possible d'effectuer le travail de coupe de manière sécuritaire à l'aide d'une telle machine, nous suggérons d'utiliser une tronçonneuse à chaîne diamantée ou autre machine de coupe adaptée à la situation.

Fait et signé à Chicoutimi, le 5 décembre 2015.

Michel Bouchard, ing., M.Sc., Ph.D.
EXPERTECH

9. RÉFÉRENCES

- .1 Évaluation analytique des forces impliquées dans le fonctionnement d'une scie à béton, préparé par Jean Ruel, ing., Ph.D., pour la CSST en décembre 2006.
- .2 Norme ISO19432, 2ième édition 2012: *Machines et matériels pour la construction des bâtiments - Tronçonneuses à disque, portatives, à moteur, à combustion interne - Exigences de sécurité.*
- .3 *Stihl TS700, 800, notice d'emploi, version française, août 2012.*
- .4 Travailler en sécurité avec la découpeuse à disque. Manuel d'utilisation préparé par le manufacturier Stihl, 2010, 21 pages.
- .5 Rapport d'enquête de la CSST no. RAP0469549: *Accident mortel survenu à un travailleur de l'entreprise Laval Construction Inc., le 18 août 2006, devant le 9370, rue Pradier, à Québec.*
- .6 Rapport d'enquête de la CSST no. RAP1031792: *Accident mortel survenu le 22 avril 2015 sur un chantier de 9194-1914 Québec Inc., situé rue Saint-Pierre Est, à St-Hyacinthe, (publié le 6 octobre 2015).*
- .7 Rapport d'enquête d'accident préparé par la CSST: *Accident mortel survenu à un travailleur de l'entreprise Phil Excavation Inc., le 16 juillet 2009, sur le chantier situé au 2315, rue Wellington, Montréal, CSST 2010, 25 pages.*
- .8 L'utilisation de la découpeuse à disque: à manipuler avec soin (www.asp-construction.org/components).
- .9 Comment utiliser votre découpeuse avec plus de sécurité, de confort et d'efficacité (http://www.husqvarna.com/files/Husqvarna/construction/user_guide/K760_Analog_Book_NEW_FR.pdf).
- .10 Troubleshooting Diamond Blades. Common Diamond Saw Blade Problems and Causes. (<http://www.dexpan.com/diamond-blade-troubleshooting-diamond-blade-problem-diamond-saw-blade-cause.aspx>)



Figure 1 : Photographies montrant la zone excavée où s'est produit l'accident du 1er septembre 2015. La victime était en train de finaliser la 2^{ème} coupe d'un tuyau d'aqueduc en fonte lorsque la découpeuse aurait soudainement cabré ou bondi en direction de l'opérateur.
Photos prises par la CSST

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915



Figure 2 : Photographies montrant la surface de la dernière coupe du tuyau fixé dans le sol. Selon l'information disponible, il restait seulement quelques centimètres à couper lorsque la victime a continué et terminé la coupe du tuyau en fonte à l'aide de la découpeuse Stihl TS800. Photos prises par la CSST.

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915



Figure 3 : Photographies montrant, de profil, la découpeuse Stihl TS800 concernée. Cette découpeuse possède une masse globale de 16,6 kilos et est munie d'une disque au diamant de 400 mm de diamètre. Le centre de masse CM est localisé au niveau du cadre central de l'appareil servant de poignée.

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

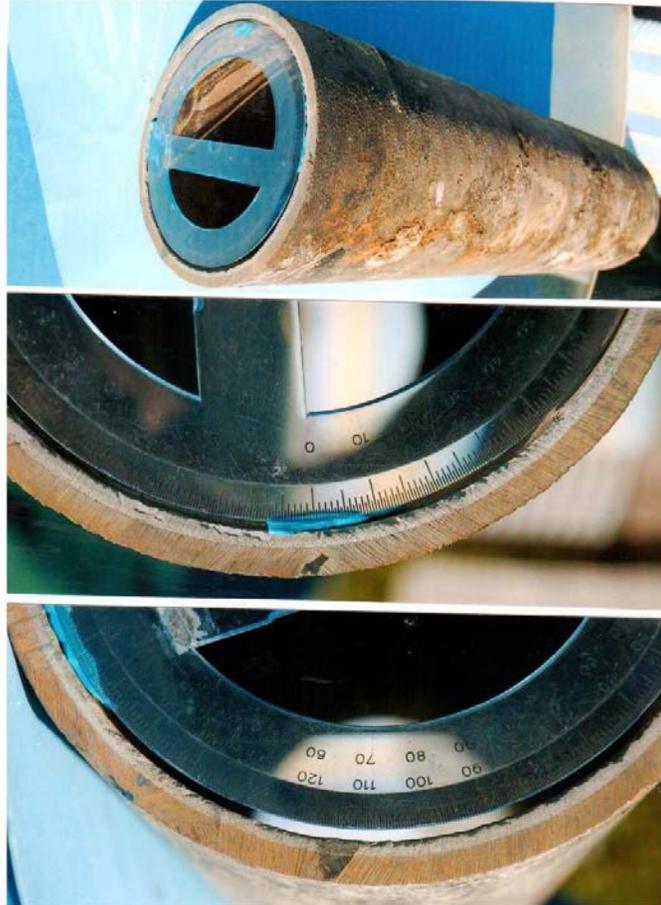


Figure 4 : Photographies montrant la section de tuyau coupée et impliquée dans l'accident. Cette section possède une longueur de 64 cm et une masse de 17 kilogrammes. Les diamètres intérieurs et extérieurs du tuyau en fonte sont respectivement de 155 mm et 175 mm. On a noté, sur la surface de coupe, une petite région où les stries de coupe se rencontrent (voir photo B), ce qui indique probablement la fin de la coupe. Il y a également une autre région présentant un aspect différent (voir photo C).

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915



Figure 5 : Photographies montrant, sous deux angles différents, les positions du disque de la découpeuse et d'un segment de tuyau requises pour couper la partie la plus basse de la pièce évidée tout en maintenant la découpeuse à l'horizontale. On note que le disque doit entrer très profondément dans le tuyau pour atteindre cette partie.

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

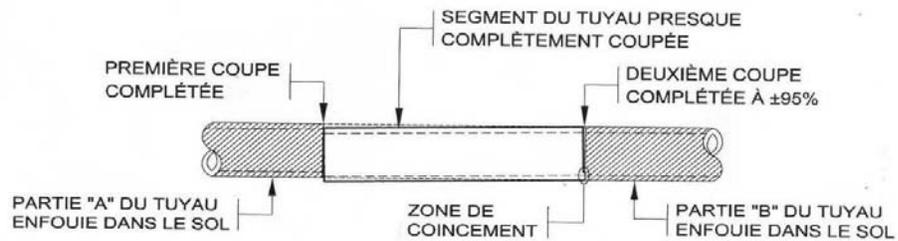


Figure 6 : Schéma illustrant le risque de coincement du disque de la découpeuse lorsque le disque est profondément entré dans le trait de scie et que l'un des segments de l'objet se déplace légèrement (par exemple, en fin de coupe).

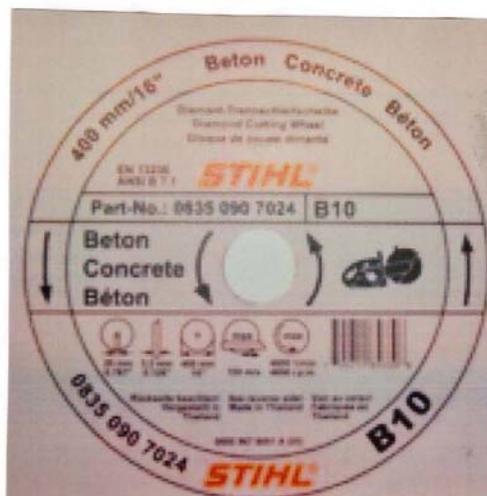


Figure 7 : Photographies montrant l'état de la fiche d'identification du disque diamantée qui était installée sur la découpeuse Stihl TS800. Pour fins de comparaison, nous avons inclus une fiche semblable publiée par Stihl.

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

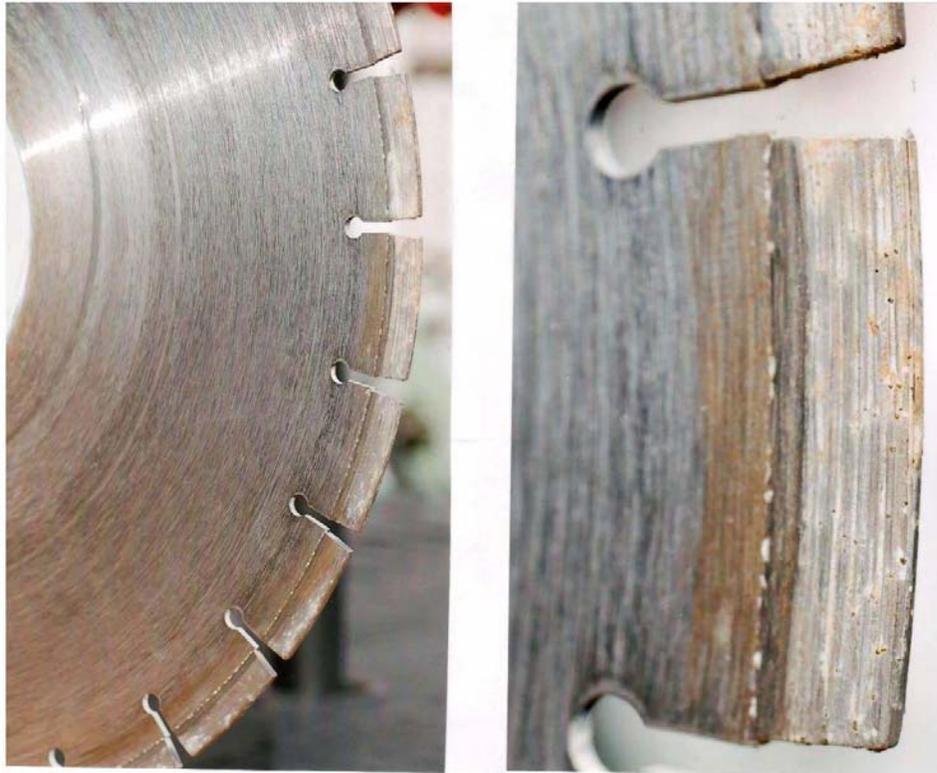


Figure 8: Photographies montrant l'état de la partie diamantée du disque. Cette partie présente des indices d'encrassement et/ou de glaçage.

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

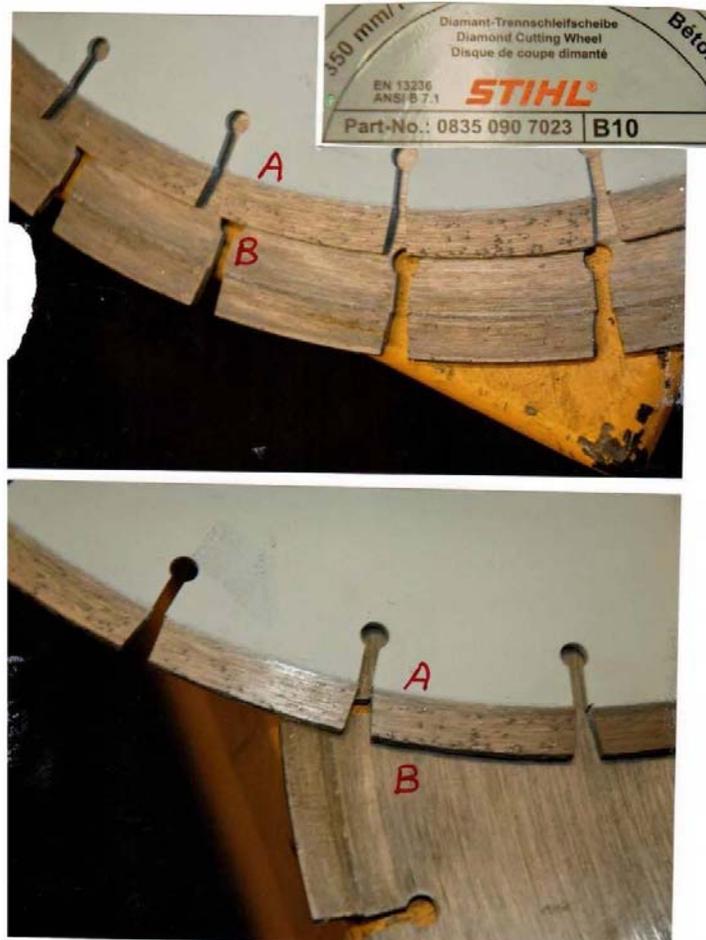


Figure 9 : Photographies montrant l'état de la surface diamantée d'un disque B10, 350 mm, neuf en comparaison avec le disque B10, 400 mm installé sur la découpeuse TS800 concernée dans le présent dossier. On note que les particules de diamant sont facilement visibles sur le disque «A» neuf, alors qu'elles semblent cachées ou très peu en relief dans le cas du disque «B» qui était installé sur la découpeuse TS800 concernée.

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

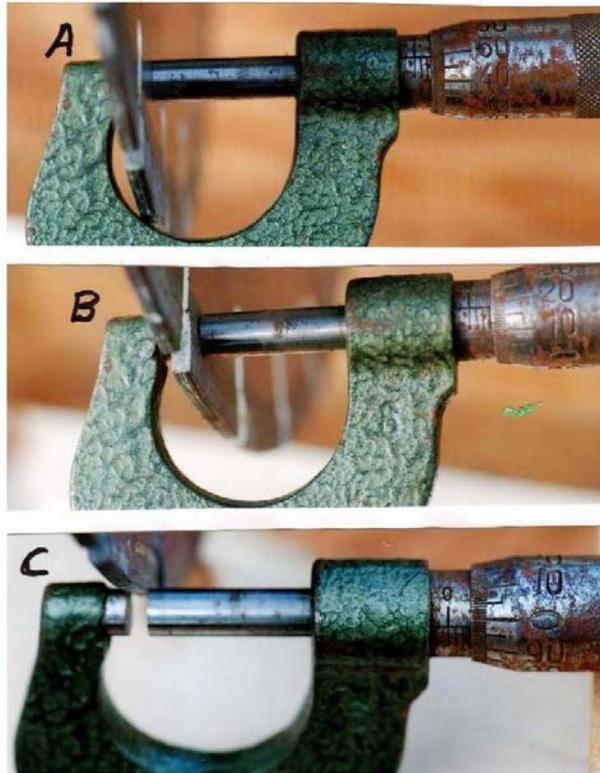


Figure 10 : Photographies montrant les variations d'épaisseur du disque:

Zone A:	à l'extérieur de la partie diamantée	~ 2,5 mm
Zone B:	en bordure de la partie diamantée	~ 3,2 mm
Zone C:	tout près de la partie frontale	~ 3,0 mm

Note: Ces mesures varient légèrement selon la position angulaire du disque.



Figure 11: Photographies montrant la face droite du disque qui était installé sur la découpeuse TS800 concernée. On note qu'il y a une empreinte en forme de spirale dont l'une des extrémités se situe non loin du cœur du disque alors que l'autre se termine à la base d'un segment diamanté.

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

ANNEXE 1

**GUIDE PRÉPARÉ PAR STIHL
MONTRANT LES DIFFÉRENTES
APPLICATIONS DES DISQUES DIAMANTÉS
SELON LE TYPE (GRADE) DE PRODUITS
ET
ABRASIVE WHEEL FOR ASPHALT
& DUCTILE IRON**

Source: Stihl

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

				Applications											
				Soft											Hard
				Asphalt	Green Concrete	Sandstone, Limestone & Slate	Color Block & Pavers	Concrete	Reinforced Concrete	Brick	Heavily Reinforced Concrete	Granite & Natural Stone	Ductile Iron Pipe	Structural Steel 70 min thick	
	Wheel Grade	Cutting Speed*	Wheel Lifetime*												
Asphalt (A)	A 5	****	**	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	
	A 20	**	*****	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	
	A 80	*****	***	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	
Concrete, Asphalt (BA)	BA 80	*****	***	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○		
Concrete (B)	B 10	**	**	○	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	
	B 20	***	***	○	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	
	B 80	****	****	○	○	○	●	●	●	●	●	○	○	○	
Hard Stone, Concrete/ Ductile Iron (SB)	SB 80	*****	****	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	
Hard Stone/ Concrete (X)	X 100	*****	****	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	

● Approved
 ○ Not approved.

Annexe 1: Tableau préparé par Stihl et indiquant les domaines d'application de leurs disques diamantés. On note que le disque B10 (Wheel Grade) semblable à celui installé sur la découpeuse lors de l'accident, n'est pas approuvé pour la coupe d'éléments en fonte ductile.

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

Abrasive Wheel for Asphalt & Ductile Iron

0835-030-8001

STIHL**STIHL®**

Designed for asphalt cutting and ductile iron pipe cutting.



(click image to enlarge)

Quick Overview

Designed for asphalt cutting and ductile iron pipe cutting.

Interested in this item or want more information?

Call Mon. through Fri. 6:30 AM - 5:00 PM PST

Phone: 916-375-8322

Email: scottc@rcbsusa.com

Can't find what you want? Give us a call and we can help you find it.

Details

STIHL asphalt and ductile iron cutting wheels have been designed for asphalt cutting and ductile iron pipe cutting such as those used for water and sewer lines, automotive components, off-highway diesel trucks, agricultural tractors, and oil well pumps. A variety of diameters and arbor sizes are available, see dealer for details.

Additional Information

Manufacturer: STIHL

For More Information on the Abrasive Wheel for Asphalt & Ductile Iron. [\[Click Here\]](#) to Link to Manufacturer Web Site

EXPERTECH - Rapport d'expertise - Dossier #350915

ANNEXE D

Programme de prévention – Ville de Chibougamau

Ville de
Chibougamau**Programme de prévention**

Général

Copie du Responsable en santé et sécurité

PP-SST-2014-06-01

ANNEXE E

Notice d'emploi – STIHL

STIHL®**STIHL TS 700, 800**Instruction Manual
Notice d'emploi

ANNEXE F

Travailler en sécurité avec la découpeuse à disque – STIHL

STIHL[®]

**Travailler en sécurité avec la
découpeuse à disque**

