

EN004252

RAPPORT D'ENQUÊTE

Version dépersonnalisée

**Accident ayant causé la mort d'un travailleur
de l'entreprise Sintra inc.
1407, rang Bois-de-l'Ail, RR1 à Saint-Flavien,
le 22 octobre 2018**

Direction régionale de la Chaudière-Appalaches

Inspecteurs :

Yannick Boutin, inspecteur

**Yan Fréchette, ing.,
inspecteur**

Date du rapport : 24 février 2020

Rapport distribué à :

- Monsieur [A], [...], Sintra inc.
 - Monsieur [B], [...], Sintra inc.
 - Monsieur [C], [...] Sintra inc.
 - Monsieur [D], [...], Sintra inc.
 - Monsieur [E], [...], Sintra inc.
 - Monsieur [F], [...], division de Sintra inc.
 - Comité de santé et de sécurité
 - Monsieur [G], [...], CSN
 - Monsieur Steeve Poisson, coroner
 - Docteur Philippe Lessard, 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
	2.1.1 MÉCANISMES DE PARTICIPATION	3
	2.1.2 GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	3
<u>3</u>	<u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	<u>4</u>
	3.1 DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	4
	3.2 DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	5
<u>4</u>	<u>ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u>	<u>6</u>
	4.1 CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	6
	4.2 CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	8
	4.2.1 CARACTÉRISTIQUES DE LA PLATE-FORME ÉLÉVATRICE	8
	4.2.2 NOMENCLATURE DE LA PLATE-FORME ÉLÉVATRICE	8
	4.2.3 CONSOLE À BORD DE LA PLATE-FORME	9
	4.2.4 DESCRIPTION DE LA SURFACE DE ROULEMENT	9
	4.2.5 VÉRIFICATION DE LA PLATE-FORME ÉLÉVATRICE	10
	4.2.6 FORMATION ET ENCADREMENT DU TRAVAILLEUR	11
	4.2.7 LA LÉGISLATION, LA RÈGLEMENTATION, LA NORME ET LES DIRECTIVES DU FABRICANT	11
	4.2.7.1 La législation	11
	4.2.7.2 La réglementation	12
	4.2.7.3 La norme	12
	4.2.7.4 Les directives du fabricant	13
	4.2.8 ESSAIS	13
	4.2.9 RAPPORT D'EXPERTISE DU DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE DE L'UNIVERSITÉ LAVAL	14
	4.3 ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES	15
	4.3.1 L'ARRÊT BRUSQUE ET LA ROTATION DE L'APPAREIL DE LEVAGE, LORSQUE LA ROUE MOTRICE GAUCHE S'EST ENGAGÉE DANS UNE CAVITÉ, A CONFÉRÉ À LA PLATE-FORME AINSI QU'À LA FLÈCHE DES DÉPLACEMENTS ET DES VITESSES SUFFISAMMENT IMPORTANTS POUR ÉJECTER LE TRAVAILLEUR.	15
	4.3.2 LE TRAVAILLEUR CHUTE D'UNE HAUTEUR APPROXIMATIVE DE 11 MÈTRES À PARTIR DE LA PLATE-FORME, LORS DU DÉPLACEMENT DE L'APPAREIL DE LEVAGE SUR UN SOL ACCIDENTÉ.	16
	4.3.3 LA SUPERVISION DU PORT DU HARNAIS DE SÉCURITÉ ET DE LA LIAISON ANTI-CHUTE PAR LE TRAVAILLEUR À BORD DE LA PLATE-FORME EST DÉFICIENTE.	17

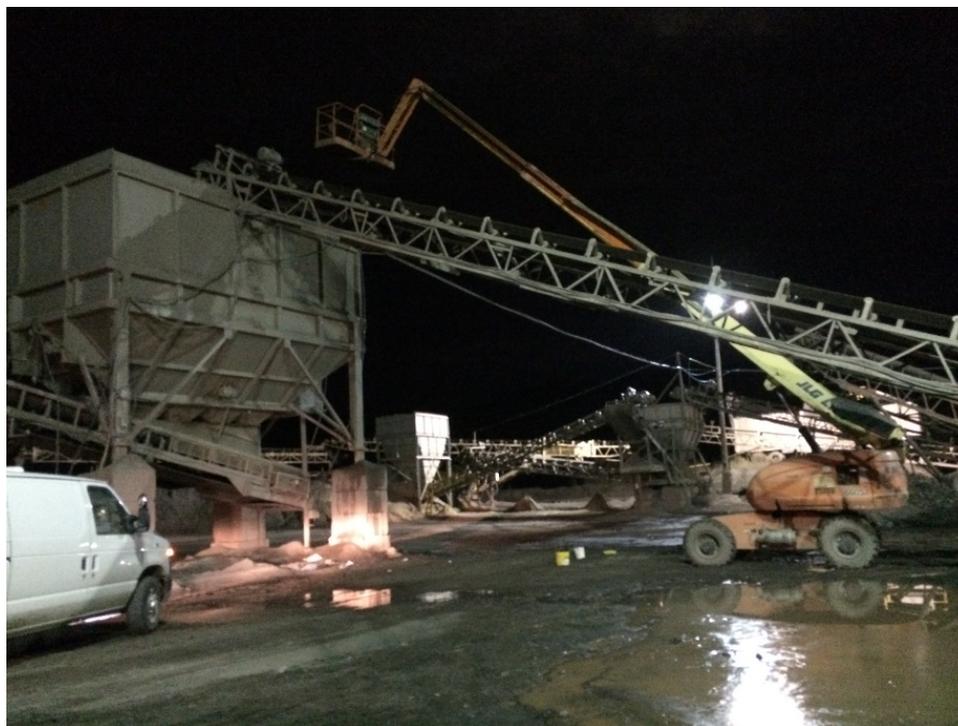
5	<u>CONCLUSION</u>	18
	5.1 CAUSES DE L'ACCIDENT	18
	5.2 SUIVIS À L'ENQUÊTE	18
	<u>ANNEXES</u>	
	ANNEXE A : Accidenté	19
	ANNEXE B : Liste des témoins et des autres personnes rencontrées	20
	ANNEXE C : Essais	21
	ANNEXE D : Rapport d'expertise	23
	ANNEXE E : Références bibliographiques	24

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

Le 22 octobre 2018, lors d'une opération visant à effectuer la vérification des courroies au sommet d'un convoyeur, un travailleur fait une chute d'environ 11 mètres à partir de la plate-forme, alors que celle-ci est déployée de 16 mètres lors du déplacement de l'appareil de levage (plate-forme élévatrice automotrice à bras articulé, ci-après nommé dans le présent rapport plate-forme élévatrice).

Conséquences

Le travailleur est transporté à l'hôpital où son décès est constaté.



(Source : CNESST)

Photo 1 : Scène de l'accident

Abrégé des causes

- L'arrêt brusque et la rotation de l'appareil de levage, lorsque la roue motrice gauche s'est engagée dans une cavité, a conféré à la plate-forme ainsi qu'à la flèche des déplacements et des vitesses suffisamment importants pour éjecter le travailleur.
- Le travailleur chute d'une hauteur approximative de 11 mètres à partir de la plate-forme, lors du déplacement de l'appareil de levage sur un sol accidenté.
- La supervision du port du harnais de sécurité et de la liaison anti-chute par le travailleur à bord de la plate-forme est déficiente.

Mesures correctives

Une décision est rendue sur les lieux la nuit du 22 au 23 octobre 2018 interdisant l'utilisation de la plate-forme élévatrice. Une inspection mécanique est exigée avant tout redémarrage de l'appareil. Le rapport RAP9119913 fait état de l'intervention effectuée. L'inspection de l'appareil a eu lieu le 24 octobre 2018 et est mentionnée dans le rapport RAP9119914. La décision est levée à ce moment, puisqu'aucune défaillance mécanique n'est constatée. Le 22 novembre 2018, un avis de correction comportant trois dérogations est émis dans le rapport d'intervention RAP1245555 :

- La vérification de la pression des pneus;
- L'élaboration d'une procédure concernant le déplacement de la plate-forme élévatrice la flèche déployée;
- Une meilleure supervision du port du harnais de sécurité et de sa liaison antichute à bord de l'appareil.

Le 30 janvier 2019, les trois dérogations sont corrigées. L'employeur a ajouté des procédures à son programme de prévention. L'information est consignée dans le rapport RAP1252082.

Le présent résumé n'a pas 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 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

L'entreprise Sintra inc. se compose de la division Est (Région de la Chaudière-Appalaches, de la Capitale nationale, du Saguenay-Lac-Saint-Jean et de la Côte-Nord, puis du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie et des Îles de la Madeleine), de la division Ouest (Région de l'Abitibi-Témiscamingue, de Lanaudière-Laurentides et de la Montérégie - Rive-Sud) et de la division Centre (Région de la Mauricie, du Centre-du-Québec et de l'Estrie).

L'établissement Construction B.M.L. Québec (St-Flavien), également nommé Carrière Ray-Car, est situé à Saint-Flavien et relève de la division Région Granulats qui est une filiale de Sintra, division Est. Les activités s'opèrent sur deux quarts de travail soit: le quart de jour où s'effectue la production et le quart de soir où s'accomplissent les tâches de maintenance. Le 22 octobre 2018, quatre personnes travaillent sur le quart de soir : trois travailleurs et un chef d'équipe.

Construction B.M.L. Québec est une filiale de Sintra, division Est. Elle effectue, quant à elle, la maintenance des équipements roulants, incluant l'appareil impliqué dans l'accident, de Carrière Ray-Car.

2.1.1 Mécanismes de participation

Il y a un comité de santé et sécurité (CSS) qui se réunit au moins trois fois par année, ou plus fréquemment au besoin. Le syndicat nomme parmi les travailleurs deux représentants à la prévention. Ils sont également membres du CSS qui est constitué de deux représentants des travailleurs et de deux représentants de l'employeur. Les représentants à la prévention de la partie syndicale sont libérés deux heures par semaine pour s'acquitter des tâches reliées à leur fonction.

2.1.2 Gestion de la santé et de la sécurité

L'établissement, Carrière Ray-Car fait partie du troisième groupe prioritaire et son secteur d'activité économique est transport et entreposage [015]. Ce dernier est visé par l'application du *Règlement sur le programme de prévention [S-2.1, 1.10]*. Ainsi, il y a un programme de prévention représentatif des dangers et des risques liés aux activités de l'entreprise. Il y a également de la documentation qui présente différentes politiques, procédures et directives à suivre sur les lieux de travail dont une section sur la protection contre les chutes et une autre sur l'utilisation sécuritaire de la plate-forme élévatrice.

Il y a un directeur de la santé et de la sécurité du travail chez Sintra division Est qui supervise les activités de prévention. Une conseillère en santé et sécurité du travail effectue des audits et des inspections du site. Elle participe également avec le contremaître à l'inspection des lieux avant son démarrage.

Des pauses santé et sécurité à chaque semaine sur différents sujets sont prévues et documentées.

SECTION 3

3 DESCRIPTION DU TRAVAIL

3.1 Description du lieu de travail

Il s'agit d'une carrière de production d'agrégats de différentes tailles destiné à l'usage interne et à la vente pour une clientèle externe. Sur le site on retrouve l'usine de concassage, les équipements roulants, un bâtiment administratif et la balance. À proximité, il y a l'usine d'asphalte, un bâtiment administratif et un garage.

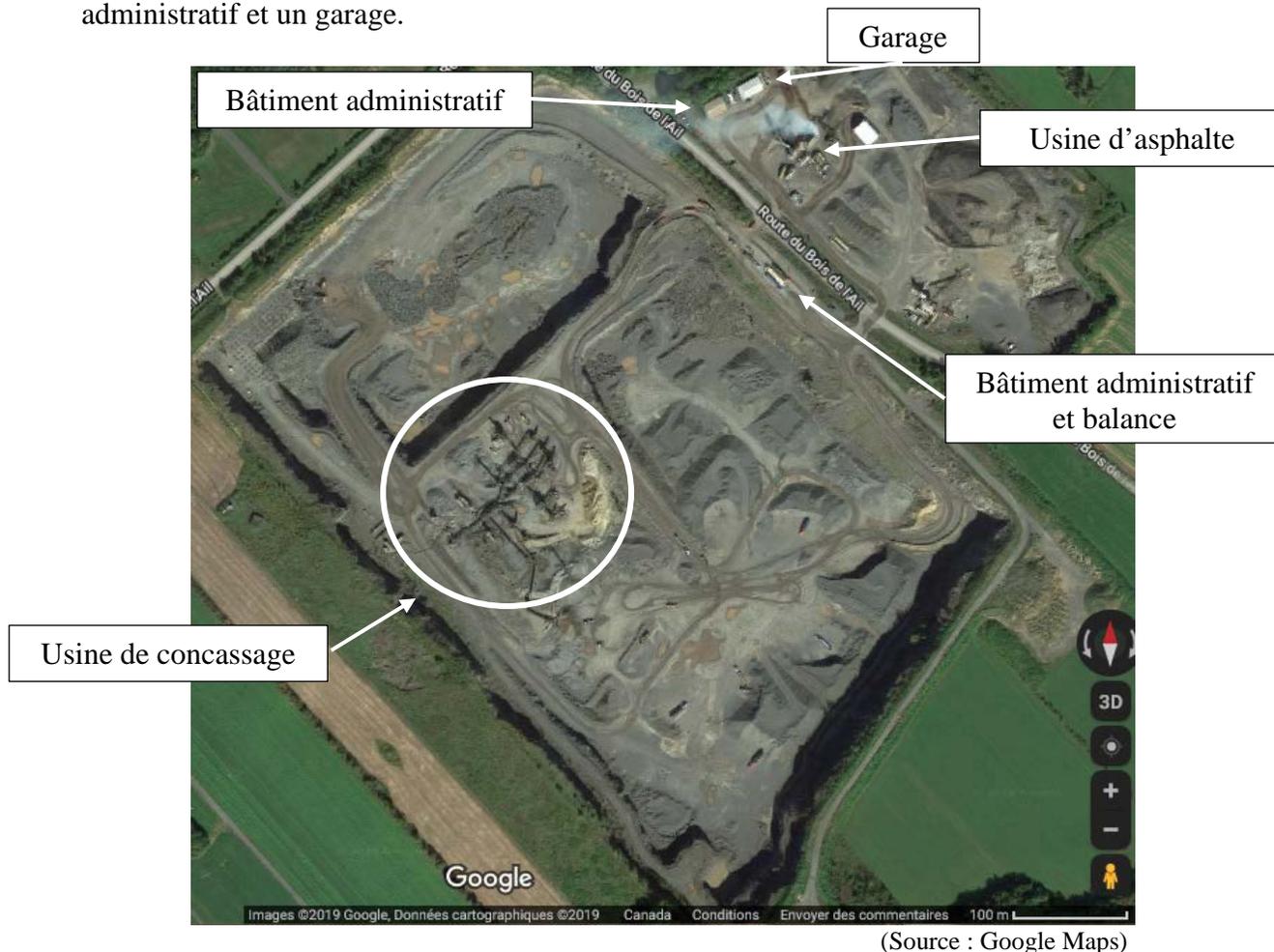


Photo 2 : Carrière Ray-Car

La station météo du Ministère de l'Environnement et Ressources Naturelles du Canada (MERNC) située à l'aéroport de Québec a enregistré à 22 h 00, le 22 octobre 2018, une température avoisinant -4.4°C et un vent de 3 km/h. La station météo du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques du Québec (MELCCQ) située à Charny n'a enregistré aucune précipitation la journée de l'accident.

3.2 Description du travail à effectuer

Le soir du 22 octobre 2018, vers 23 h 00, la tâche de monsieur [H], ci-après nommé le travailleur, consiste à effectuer la vérification et la maintenance de l'usine de concassage lors du quart de travail de soir. L'usine de concassage est éclairée par des lampadaires au pourtour des lieux lors du coucher de soleil. Le soir de l'accident, le travailleur s'apprête à effectuer la vérification des courroies des organes de transmission au niveau du tambour de tête du convoyeur à courroie d'alimentation de la benne #2 à l'aide d'un appareil de levage. Les organes de transmission du convoyeur sont situés à une hauteur approximative de 11 mètres.

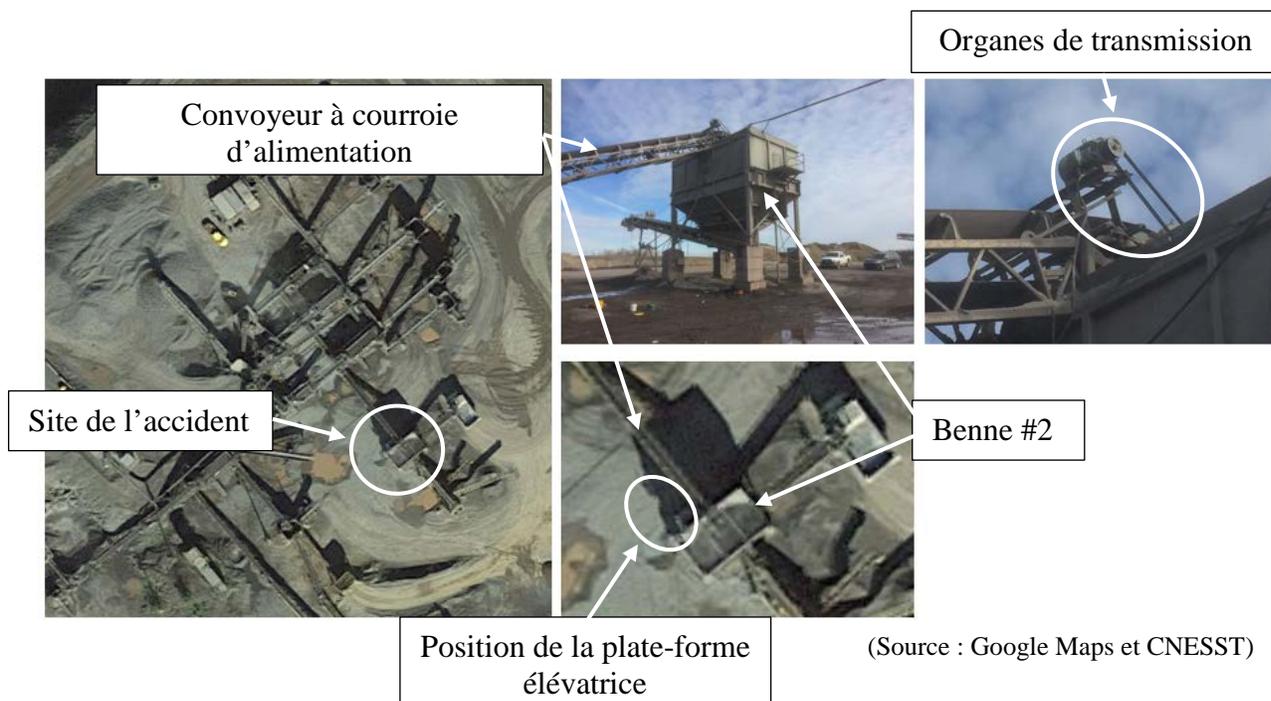


Photo 3 : Usine de concassage

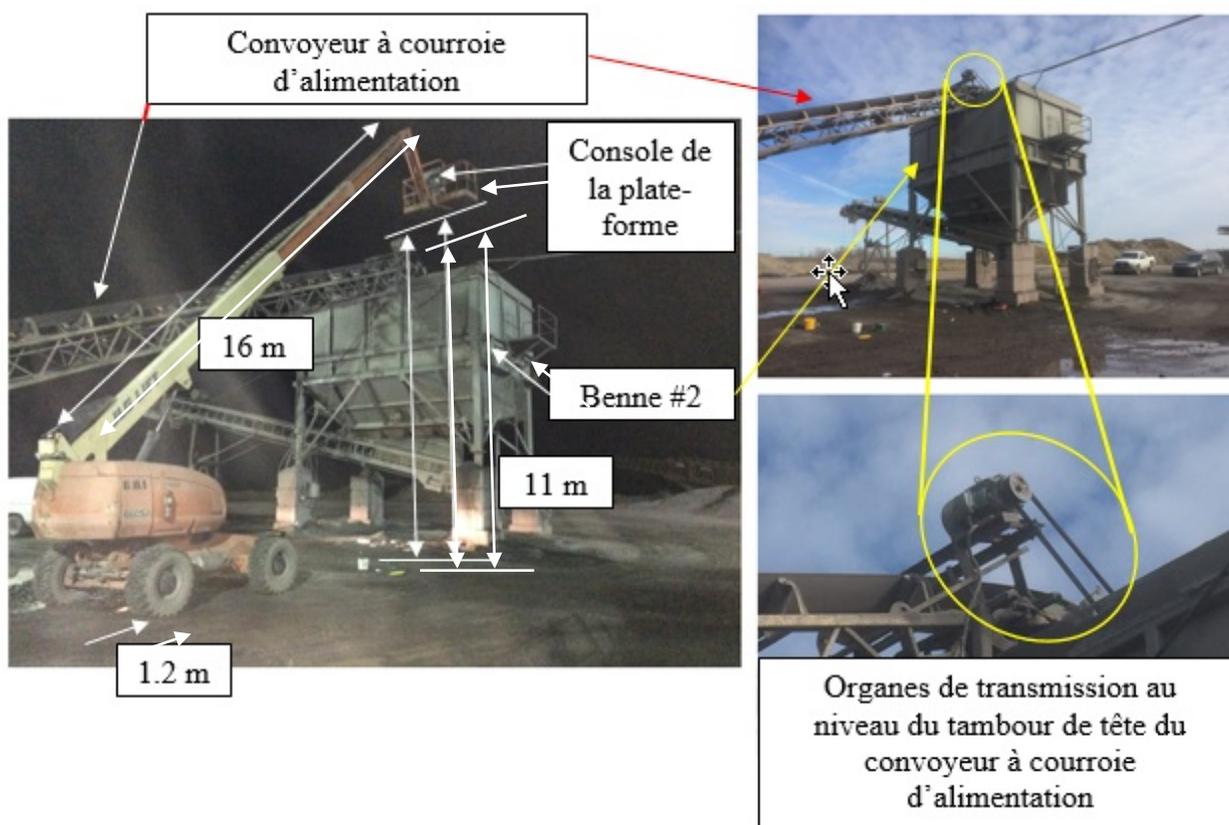
SECTION 4

4 ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE

4.1 Chronologie de l'accident

Le 22 octobre 2018, le travailleur commence son quart de travail à 14h30. Il travaille à la maintenance du concasseur primaire avec [I] jusqu'à environ 22h30. [I] quitte ensuite le travailleur pour aller couper des morceaux de fer au garage. Le travailleur continue seul la maintenance des équipements en fonction de la feuille manuscrite qui lui est remise par [I] concernant les travaux à effectuer.

Le travailleur se prépare à exécuter une vérification au niveau des courroies des organes de transmission du convoyeur à courroie d'alimentation de la benne #2 à l'aide de l'appareil de levage. Ceux-ci sont situés à une hauteur approximative de 11 mètres. Afin de placer la plate-forme pour effectuer sa tâche, il fait une manœuvre avant de 1,2 mètre avec l'appareil dont la flèche est déployée de 16 mètres.

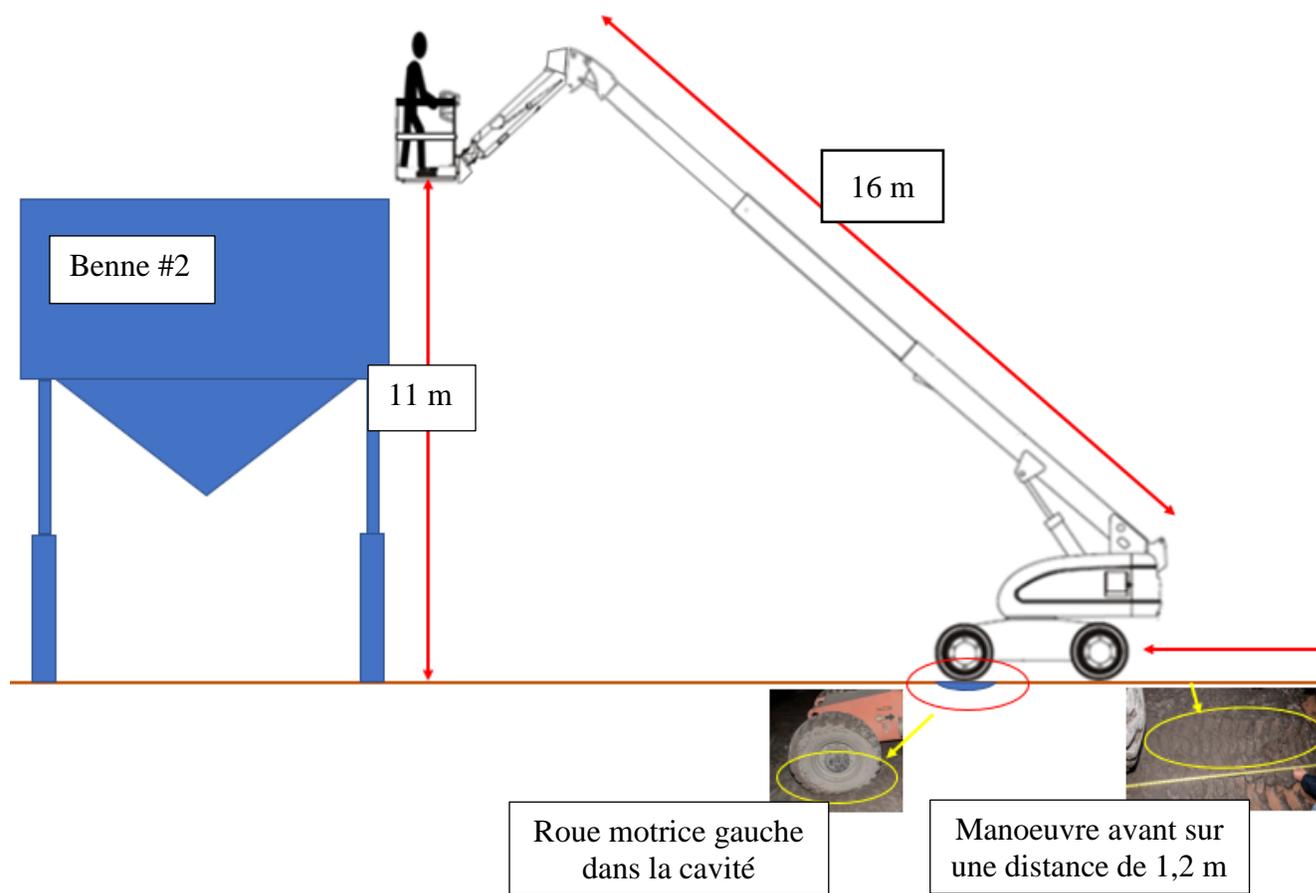


(Source : CNESST)

Photo 4 : Scène de l'accident

Lors du déplacement de la plate-forme élévatrice, la roue motrice gauche roule dans une cavité de 7,6 centimètres de profondeur. Il en résulte que la flèche et la plate-forme subissent des déplacements et des vitesses importants. Le travailleur est déstabilisé, puis éjecté de la plate-forme. Il fait une chute de 11 mètres.

Vers 22h45, [I] aperçoit le travailleur et plusieurs outils au sol. Comme il n'a pas de moyen de communication, il retourne au garage contacter les services d'urgence et demande à un collègue d'aller au chevet du travailleur. Les ambulanciers arrivent sur les lieux vers 23h15. Le travailleur est transporté à l'hôpital où son décès est constaté le 23 octobre 2018 vers 00 h 10.



(Source : CNESST)

Figure 1 : Schéma de la scène de l'accident

4.2 Constatations et informations recueillies

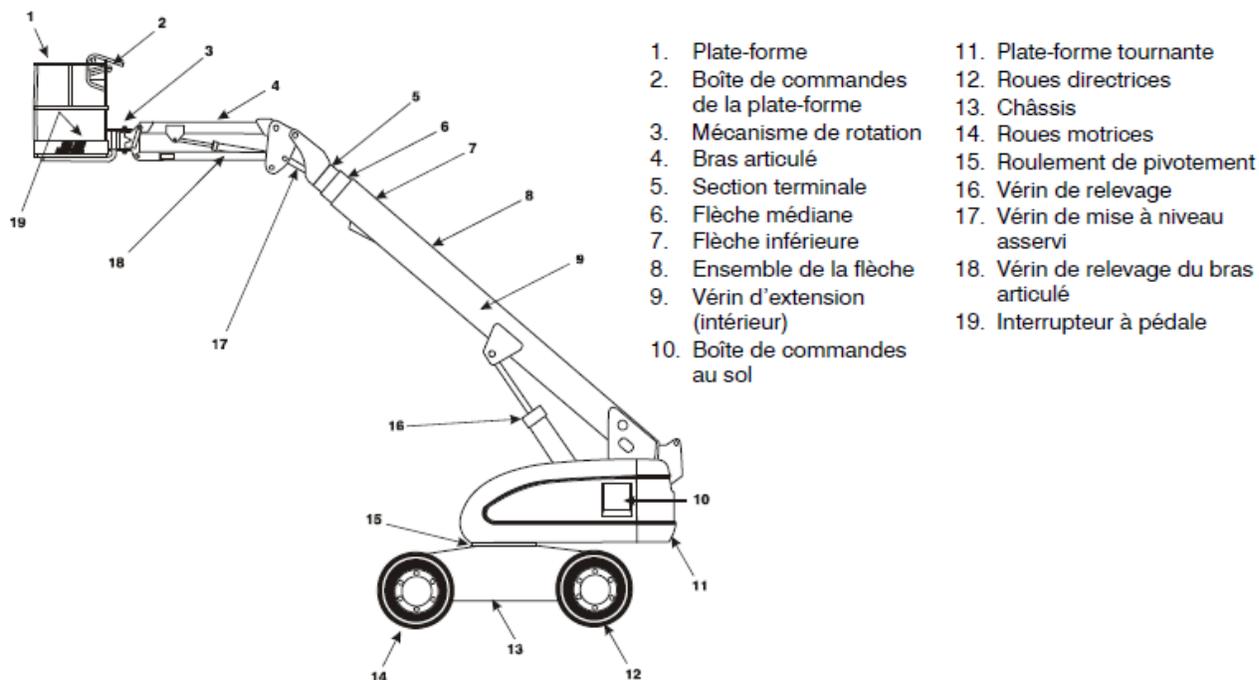
4.2.1 Caractéristiques de la plate-forme élévatrice

La plate-forme élévatrice a les caractéristiques suivantes :

- 1) Marque JLG modèle 660SJ.
- 2) Année de fabrication est 2004.
- 3) Elle mesure 11,4 mètres de longueur par 2,42 mètres de largeur par 2,56 mètres de hauteur.
- 4) L'empattement est de 2,48 mètres.
- 5) Son poids est de 12 630 kilogrammes.
- 6) La plate-forme mesure 2,4 mètres de long par 90 centimètres de large.
- 7) La hauteur de la flèche est de 20,31 mètres.
- 8) La longueur de la flèche est de 17,6 mètres.
- 9) La capacité de charge de la plate-forme est de 226 kilogrammes.

Le poids de l'outillage et du travailleur à bord de la plate-forme est estimé à 138 kilogrammes.

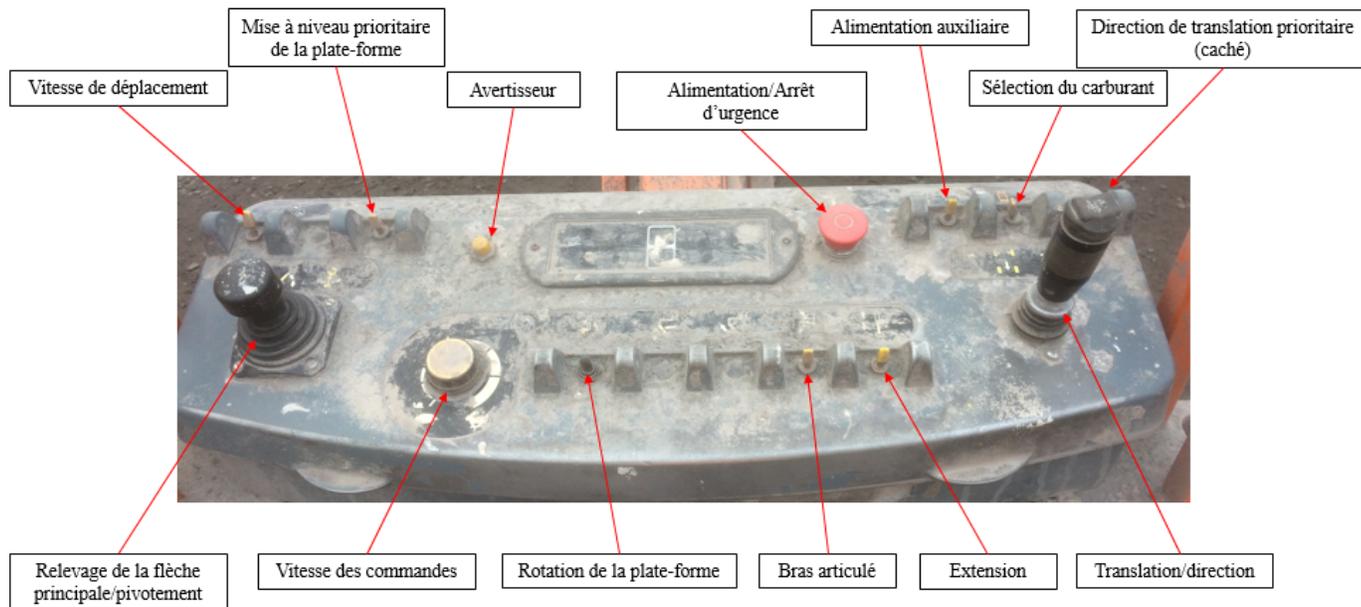
4.2.2 Nomenclature de la plate-forme élévatrice



(Source : JLG – Manuel d'utilisation et de sécurité)

Figure 2 : Plate-forme élévatrice JLG modèle 660SJ

4.2.3 Console à bord de la plate-forme



(Source : CNESST)

Photo 5 : Console à bord de la plate-forme

4.2.4 Description de la surface de roulement

La surface de roulement est en terre battue, irrégulière (fondrière, renflement, trous) et boueuse. Il y a une cavité d'une profondeur de 7,6 centimètres (photo A) par 90 centimètres de longueur (photo B) et elle s'apparente à un canal. Le sol présente une inclinaison de 4,4 degrés (photo C).



(Source : CNESST)

Photo 6 : Cavité

4.2.5 Vérification de la plate-forme élévatrice

La plate-forme élévatrice a fait l'objet d'une inspection annuelle le 16 mai 2018 par Machinerie JP Plante inc. Une attestation d'ingénieur a été remise à l'employeur démontrant sa conformité.

À la suite de l'accident, une inspection de l'équipement a été effectuée par une firme spécialisée afin de déterminer si une défaillance mécanique pouvait expliquer l'accident. Celle-ci n'a révélé aucun bris mécanique, à l'exception du manque de pression d'air dans les pneus, notamment la roue motrice gauche. Au moment de l'accident, la pression d'air dans les pneus de la plate-forme élévatrice ne respecte pas les directives du fabricant et le marquage sur le flanc des pneus. À cet égard, la pression d'air est de 30 psi pour le pneu avant gauche, de 55 psi pour le pneu arrière gauche et pour les pneus du côté droit de 60 psi. Le flanc des pneus indique 85 psi.

Un calepin contenant une grille d'inspection quotidienne doit être complétée par les opérateurs avant son utilisation. Cependant, cette dernière n'est pas complétée quotidiennement tel que démontré par le calepin retrouvé dans la machine le 24 octobre 2018. En effet, des inspections ont été effectuées le 11 juillet 2018, le 24 juillet 2018 et le 3 octobre 2018 alors qu'entre le 3 et le 22 octobre 2018, la plate-forme élévatrice est utilisée à chaque jour.

sintra www.sintra.ca

NACELLES ET PLATEFORMES ÉLÉVATRICES
INSPECTION QUOTIDIENNE

DATE: Jour, Mois, Année. HEURE: Hh, Min.

GAZ PROPANE ÉLECTRIQUE DIÉSEL N° D'UNITÉ

X = PROBLÈME DÉTECTÉ ✓ = AUCUN PROBLÈME DÉTECTÉ

INSPECTION VISUELLE À L'ARRÊT	INSPECTION DE FONCTIONNEMENT
VÉRIFIEZ LES COMPOSANTES DU VÉHICULE	VÉRIFIEZ ET TESTEZ LES FONCTIONS DE BASE
<input type="checkbox"/> ALIMENTATION EN CARBURANT	<input type="checkbox"/> COMMANDES TERRESTRES
<input type="checkbox"/> ROUES / ÉTAT DES PNEUS	<input type="checkbox"/> COMMANDES PLATE-FORME
<input type="checkbox"/> PLANCHER / PLATE-FORME LIBRE	<input type="checkbox"/> ESSAI FREINS
<input type="checkbox"/> PLANCHER RÉTRACTABLE / EXTENSION	<input type="checkbox"/> KLAXON
<input type="checkbox"/> OUVERTURE / FERMETURE BARRIÈRE	<input type="checkbox"/> FEUX ET LUMIÈRES
<input type="checkbox"/> ANCRAGE ANTI-CHÛTE	<input type="checkbox"/> ARRÊT D'URGENCE
<input type="checkbox"/> HARNAIS INSPECTÉ	<input type="checkbox"/> AVERTISSEUR PENTE
<input type="checkbox"/> GARDE-CORPS	<input type="checkbox"/> ALARME DE MOUVEMENT
<input type="checkbox"/> PLINTHES	<input type="checkbox"/> MONTÉE
<input type="checkbox"/> STABILISATEUR / SUPPORT	<input type="checkbox"/> DESCENTE
<input type="checkbox"/> STRUCTURE ARTICULÉE D'ÉLÉVATION	<input type="checkbox"/> VITESSE DE DESCENTE
<input type="checkbox"/> CYLINDRES HYDRAULIQUES	<input type="checkbox"/> AVANCÉE
<input type="checkbox"/> RACCORDS	<input type="checkbox"/> DÉPLACEMENT GAUCHE
<input type="checkbox"/> EXTINCTEUR	<input type="checkbox"/> DÉPLACEMENT DROITE
<input type="checkbox"/> ÉTIQUETTE ET PLAQUES VISIBLES	<input type="checkbox"/> ÉLÉVATEUR FONCTIONNEL
<input type="checkbox"/> MANUEL D'INSTRUCTIONS	VÉRIFIEZ JAUGES, INDICATEURS ET NIVEAUX
<input type="checkbox"/> CADRANS INDICATEURS	<input type="checkbox"/> PRESSION D'HUILE
<input type="checkbox"/> STABILISATEURS	<input type="checkbox"/> FLUIDE HYDRAULIQUE
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> HUILE MOTEUR, TRANSMISSION
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> LIQUIDE REFOUDISSEMENT

COMMENTAIRES (NATURE DE LA DÉFECTUOSITÉ):

INSPECTEUR (LÉTTRES MOULÉES): M-118 DE (09-2016) BLANC: GARAGE • VERT: CARNET
FORMICHEX, 438 888-8782 0002-1

(Source : Sintra inc.)

Figure 3 : Grille d'inspection

4.2.6 Formation et encadrement du travailleur

[...]. Il recommençait à son poste de soudeur carrière le 22 octobre 2018.

Il a été formé le 23 avril 2018 pour l'utilisation de l'appareil de levage et pour les dispositifs antichute par l'entreprise Formation SFSST inc. Une carte de compétence et une attestation de formation lui ont été remises. Le programme de prévention fait mention d'une politique de tolérance zéro en regard du port des équipements de protection individuels (ÉPI), notamment, du port du harnais de sécurité et sa liaison antichute dès qu'un travailleur se tient dans la plate-forme de l'appareil de levage.

Les témoignages d'un [...], du [I] et [J] ont démontré que le travailleur ne portait pas régulièrement son harnais de sécurité et sa liaison antichute. Plusieurs avis verbaux lui ont été adressés afin qu'il régularise la situation. Le non-respect de la directive n'a pas été sanctionné, tel que prévu dans le programme de prévention de l'entreprise.

À proximité de l'usine de concassage, une boîte de camion est utilisée comme lieu d'entreposage d'outillages et autres équipements. Des harnais de sécurité et des liaisons antichute y sont présents et accessibles. Au moment de l'accident, le travailleur ne porte pas de harnais de sécurité de même que sa liaison antichute malgré leur disponibilité.

4.2.7 La législation, la réglementation, la norme et les directives du fabricant

4.2.7.1 La législation

La *Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST)* [L.R.Q., c. S-2.1] à l'article 51 (5), précise que l'employeur doit utiliser les méthodes et techniques visant à identifier, contrôler et éliminer les risques pouvant affecter la santé et la sécurité du travailleur.

L'article 51 (7) de la LSST précise que l'employeur doit fournir un matériel sécuritaire et assurer son maintien en bon état.

Quant à lui, l'article 51 (9) énonce que l'employeur doit informer adéquatement le travailleur sur les risques reliés à son travail et lui assurer la formation, l'entraînement et la supervision appropriés afin de faire en sorte que le travailleur ait l'habileté et les connaissances requises pour accomplir de façon sécuritaire le travail qui lui est confié.

Selon l'article 51.1., sans être un employeur, le contremaître du site qui utilise les services de plusieurs travailleurs aux fins de son établissement, se doit de respecter les obligations imposées à un employeur, conformément à la présente loi.

Le travailleur a également des obligations. Selon la *LSST* à l'article 49 (2), le travailleur doit prendre les mesures nécessaires pour protéger sa santé, sa sécurité ou son intégrité physique.

4.2.7.2 La réglementation

Le *Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) [S-2.1, r.13]* à l'article 245 mentionne que tout appareil de levage doit être utilisé, entretenu et réparé de manière à ce que son emploi ne compromette pas la santé, la sécurité ou l'intégrité physique des travailleurs.

Selon l'article 339, le travailleur doit porter ou utiliser, selon le cas, les moyens et les équipements de protection individuels ou collectifs requis en application du RSST, notamment un harnais de sécurité et une liaison antichute (articles 347 et 348).

4.2.7.3 La norme

La norme CAN/CSA B354.4-02, Plates-formes élévatrices automotrices à bras articulé précise à l'article 5.3.1 a) sur l'inspection quotidienne que l'opérateur de la plate-forme doit examiner périodiquement et observer en cours d'utilisation ainsi qu'entre les inspections régulières pour déceler toute défectuosité plusieurs éléments, dont les pneus et de leur pression adéquate.

De plus, à l'article 6.2 a) et c), avant et durant l'utilisation de la machine, l'endroit où l'appareil sera utilisé doit être inspecté à la recherche des risques possibles, dont les fondrières ou les trous, de même que les bosses et obstacles sur le sol.

Ensuite, l'article 6.4.1.2 précise que tous les occupants de la plate-forme élévatrice doivent porter un dispositif antichute. Également, à l'article 6.4.17 a), c) et d), avant et durant les déplacements avec la plate-forme en position élevée, le conducteur doit s'assurer de bien voir le sol et le trajet à parcourir et de se tenir à une distance sécuritaire des obstacles, des débris, des pentes descendantes, des fondrières, des rampes ou autres dangers dans le but de s'assurer un déplacement en toute sécurité et de conduire selon les instructions du constructeur.

Puis finalement, à l'article 6.4.21, la plate-forme élévatrice ne doit être utilisée que sur le type de surface spécifié par le constructeur.

4.2.7.4 Les directives du fabricant

Il est inscrit dans le manuel du fabricant dans la section « *consignes de sécurité* » afin de prévenir les risques de basculement ou de chute, lors du fonctionnement, toute personne se trouvant à bord de la plate-forme doit porter un harnais de sécurité attaché à une sangle à un point de fixation certifié.

Il y est précisé également dans cette section, au niveau de l'inspection du lieu de travail de repérer la présence au sol des trous, bosses, devers, obstructions, débris et revêtements susceptibles de dissimuler des trous ou autres dangers. De même, au niveau des risques de basculement, le constructeur demande de ne pas relever la plate-forme ni rouler avec la plate-forme relevée sur des surfaces inclinées, irrégulières ou meubles. L'utilisateur doit s'assurer que la machine se trouve sur une surface ferme, plane et uniforme avant de relever la plate-forme ou de conduire la plate-forme relevée.

Dans la section « *fonctionnement de la machine* », caractéristiques et limites de fonctionnement, il est noté que la flèche peut être relevée au-dessus de l'horizontale, avec ou sans charge dans la plate-forme si la machine se trouve sur une surface uniforme, ferme et plane et la pression des pneus doit être correcte.

Pour le fabricant, dans la section « *caractéristiques générales et maintenance pour l'opérateur* », il y est inscrit que la pression des pneus doit être égale à la pression d'air indiquée sur le côté du produit ou l'autocollant de la jante pour garantir un fonctionnement correct et sûr.

4.2.8 Essais

Nous avons réalisé des essais le 24 octobre 2018, d'une part afin de connaître la rigidité de la flèche de la plate-forme élévatrice impliquée dans l'événement et d'autre part, afin de reproduire le mouvement de la flèche et de la plate-forme au moment de l'accident. Finalement, le 10 septembre 2019, nous avons effectué des essais techniques avec un appareil de levage de même marque et modèle. (Voir annexe C)

4.2.9 Rapport d'expertise du département de génie mécanique de l'Université Laval

Un mandat a été donné à M. Jean Ruel, ing., Ph.D., du département de génie mécanique de l'Université Laval afin de déterminer les forces auxquelles étaient exposés le travailleur et déterminer si ces forces étaient suffisantes pour l'éjecter de la plate-forme. Le mandat de l'expertise comporte les six éléments suivants :

- 1) Évaluer les forces nécessaires à l'éjection du travailleur dans les conditions de l'accident, afin de répondre aux deux questions suivantes :
 - a) Est-ce que la plate-forme produit une force nécessaire pour éjecter l'opérateur et les outils ?
 - b) Comment la plate-forme réagit-elle ?
- 2) Expliquer sommairement l'effet « trampoline » pour un travailleur installé sur la plate-forme lors du déplacement de celle-ci, et évaluer si l'effet trampoline ou l'effet de fouettement de la plate-forme produit une force suffisante pour éjecter l'opérateur et les outils.
- 3) Expliquer l'effet des trois mouvements simultanés (axe des X, Y et Z) sur l'opérateur.
- 4) Expliquer l'effet ou l'impact des pneus dégonflés sur la plate-forme lors de son passage dans la cavité de 7,6 centimètres de profondeur et la flèche déployée de 16 mètres.
- 5) Analyser la différence entre le passage d'une roue motrice avant et le passage d'une roue arrière dans une cavité de 7,6 centimètres sur la plate-forme, lorsque la flèche est déployée de 16 mètres.
- 6) Conclure si le travailleur a été catapulté ou éjecté de la plate-forme et pourquoi.

D'abord, l'étude de la dynamique de la flèche et de la plate-forme, selon l'expertise réalisée a permis d'établir que la rotation de la plate-forme élévatrice lorsque sa roue motrice gauche s'est engagée dans une cavité de 7,6 centimètres de profondeur a conféré à la plate-forme des déplacements et des vitesses importantes dans les trois directions (les axes des X, Y et Z). Selon les calculs, la vitesse résultante ayant pu être d'une intensité de 2,68 m/s et le déplacement global résultant de 0,67 mètre. À cette vitesse, l'expert est d'avis que l'arrêt brusque de l'appareil de levage dans la cavité a pu produire sur le travailleur, à cause du mouvement relatif de la plate-forme, des forces importantes le déstabilisant et pouvant l'éjecter.

Il est mentionné dans le rapport d'expertise qu'à la suite de ce freinage, l'élasticité de la flèche et l'énergie cinétique qu'elle contenait, ainsi que le faible facteur d'amortissement du système, ont résulté en des oscillations d'amplitude importante. Ces oscillations subies par la flèche et la plate-forme, dont la masse est importante par rapport à celle du travailleur et des outils, ont pu contenir suffisamment d'énergie pour que le travailleur et ses outils soient éjectés.

Par ailleurs, selon l'expert consulté, une analyse de l'effet trampoline a conduit au constat, qu'en plus des oscillations occasionnées par l'arrêt soudain au fond de la cavité, qu'il est possible et plausible de supposer que la plate-forme pouvait déjà subir un certain mouvement oscillant. En se déplaçant sur un terrain non pavé et irrégulier, celle-ci a pu rencontrer d'autres cavités ou bosses avant d'atteindre la position lors de l'accident. Une éventuelle oscillation préalable a pu contribuer à augmenter le mouvement de la flèche et de la plate-forme produit par l'arrêt soudain au fond de la cavité.

4.3 Énoncés et analyse des causes

4.3.1 L'arrêt brusque et la rotation de l'appareil de levage, lorsque la roue motrice gauche s'est engagée dans une cavité, a conféré à la plate-forme ainsi qu'à la flèche des déplacements et des vitesses suffisamment importants pour éjecter le travailleur.

Dans le cadre de l'expertise réalisée, l'étude de la dynamique effectuée de la flèche et de la plate-forme par l'expert a permis d'établir que la rotation de la plate-forme élévatrice lorsque sa roue motrice gauche s'est engagée dans une cavité de 7,6 centimètres de profondeur, a conféré à la plate-forme des déplacements et des vitesses importantes dans les trois directions. La vitesse résultante ayant pu être d'une intensité de 2,68 m/s et le déplacement global résultant de 0,67 mètre.

À cette vitesse, il note que l'arrêt brusque de la plate-forme élévatrice a pu produire sur le travailleur, à cause du mouvement relatif de la plate-forme, des forces inertielles importantes le déstabilisant et pouvant l'éjecter.

À la suite de ce freinage, l'élasticité de la flèche et l'énergie cinétique qu'elle contenait, ainsi que le faible facteur d'amortissement du système, ont résulté en des oscillations d'amplitude importante. Ces oscillations subies par la flèche et la plate-forme, dont la masse est importante par rapport à celle du travailleur et des outils, ont pu contenir suffisamment d'énergie pour que le travailleur et ses outils soient éjectés.

Par ailleurs, une analyse de l'effet trampoline a conduit au constat qu'en plus des oscillations occasionnées par l'arrêt soudain au fond de la cavité, qu'il est possible et plausible de supposer que la plate-forme pouvait déjà subir un certain mouvement oscillant. En se déplaçant sur un terrain non pavé et irrégulier, celle-ci a pu rencontrer d'autres cavités ou bosses avant d'atteindre la position de l'accident. Une éventuelle oscillation préalable a pu contribuer à augmenter le mouvement de la flèche et de la plate-forme produit par l'arrêt soudain au fond de la cavité.

Cette cause est retenue

4.3.2 Le travailleur chute d'une hauteur approximative de 11 mètres à partir de la plate-forme, lors du déplacement de l'appareil de levage sur un sol accidenté.

Le 22 octobre 2018 vers 22 h 30, le travailleur se prépare à effectuer une réparation au niveau des courroies des organes de transmission du tambour de tête du convoyeur à courroie d'alimentation de la benne #2. Les organes de transmission du convoyeur sont situés à une hauteur estimée de 11 mètres. Pour exécuter cette tâche, il utilise la plate-forme élévatrice puis la positionne en face de la benne #2. Lors d'une manœuvre de positionnement, il est éjecté et fait une chute jusqu'au sol. À ce moment, le travailleur est au poste de commande de la plate-forme élévatrice et ne porte pas son harnais de sécurité ni sa liaison antichute.

Cette cause est retenue

4.3.3 La supervision du port du harnais de sécurité et de la liaison anti-chute par le travailleur à bord de la plate-forme est déficiente.

Le 23 avril 2018, le travailleur a reçu les formations pour l'utilisation de l'appareil de levage et pour les dispositifs antichute. Une carte de compétence et une attestation de formation lui ont été remises. Le programme de prévention de l'employeur fait mention d'une politique de tolérance zéro en regard au port des équipements de protection individuels (ÉPI), notamment, du port du harnais de sécurité dès qu'un travailleur se tient dans la plate-forme élévatrice.

Les témoignages d'un [...], de [I] et du [J] ont démontré que le travailleur ne portait pas régulièrement son harnais de sécurité et sa liaison antichute. Plusieurs avis verbaux lui ont été donnés afin qu'il régularise la situation. Le non-respect de la directive n'a pas été sanctionné, tel que prévu dans le programme de prévention de l'entreprise.

Cette cause est retenue

SECTION 5

5 CONCLUSION

5.1 Causes de l'accident

- L'arrêt brusque et la rotation de l'appareil de levage, lorsque la roue motrice gauche s'est engagée dans une cavité, a conféré à la plate-forme ainsi qu'à la flèche des déplacements et des vitesses suffisamment importants pour éjecter le travailleur.
- Le travailleur chute d'une hauteur approximative de 11 mètres à partir de la plate-forme, lors du déplacement de l'appareil de levage sur un sol accidenté.
- La supervision du port du harnais de sécurité et de la liaison anti-chute par le travailleur à bord de la plate-forme est déficiente.

5.2 Suivis à l'enquête

- Informer l'Association de la construction du Québec (ACQ), l'Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec (APCHQ), l'Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ) et l'Association patronale des entreprises en construction du Québec (APECQ) des conclusions de l'enquête.
- Informer les centres de location de plates-formes élévatrices qui offrent de la formation des conclusions de l'enquête.
- Dans le cadre du partenariat de la CNESST visant l'intégration de la santé et de la sécurité du travail dans la formation professionnelle et technique, le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur, diffuser à des fins informatives et pédagogiques le rapport d'enquête dans les établissements de formation de l'industrie de la construction.

ANNEXE A**ACCIDENTÉ**

Nom, prénom : [H]

Sexe : [...]

Âge : [...]

Fonction habituelle : [...]

Fonction lors de l'accident : Soudeur carrière

Expérience dans cette fonction : [...]

Ancienneté chez l'employeur : [...]

Syndicat : [...]

ANNEXE B

Liste des témoins et des autres personnes rencontrées

- Monsieur [A], [...], Sintra inc.
- Monsieur [B], [...], Sintra inc.
- Monsieur [C], [...], Sintra inc.
- Monsieur [D], [...], Sintra inc.
- Monsieur [E], [...], Sintra inc.
- Madame [K], [...], Sintra inc.
- Monsieur [F], [...], Carrière Ray-Car, division de Sintra inc.
- Monsieur [I], [...], Carrière Ray-Car, division de Sintra inc.
- Monsieur [L], [...], Carrière Ray-Car, division de Sintra inc.
- Madame [M], [...], Stikeman Elliott.
- Monsieur Julien Lemieux, sergent enquêteur, Sûreté du Québec.
- Monsieur Charles St-Onge, agent, Sûreté du Québec.
- Monsieur Alain Baron, enquêteur, Sûreté du Québec.
- Monsieur Danny Godin, technicien en scène de crime, Sûreté du Québec.
- Monsieur Raphaël Perron, agent, Sûreté du Québec.
- Monsieur Steeve Fortin, sergent, Sûreté du Québec.
- Monsieur Xavier Perron, agent, Sûreté du Québec.
- Monsieur [N], [...], Services mécaniques élévatech.
- Monsieur Marc Gagnon, agent de développement, Formation continue et services aux entreprises de la Commission scolaire des Navigateurs;
- Monsieur Daniel Étienne-Vachon, directeur du Centre de formation en mécanique de véhicules lourds de la Commission scolaire des Navigateurs;
- Monsieur Pierre Gamache, enseignant, Commission scolaire des Navigateurs;
- Monsieur [O], [...], Nouvelle hauteur inc.;
- Monsieur [P], [...], Nouvelle hauteur inc.;
- Monsieur [Q], [...], Mortier en trémie ABL inc.;
- Monsieur [R], [...], Mortier en trémie ABL inc.;
- Monsieur [S], [...], Mortier en tremie ABL inc.
- Monsieur Jean Ruel, ing. Ph.D., professeur titulaire, département de génie mécanique, Université Laval.

ANNEXE C

Essais

Mesure de rigidité de la flèche

Cet essai visait à vérifier la rigidité de la flèche de la plate-forme élévatrice lorsqu'elle est positionnée à l'horizontale. Une mesure à vide de la plate-forme a été effectuée à partir du plancher de celle-ci et du sol. Ensuite, d'autres mesures ont été prises de la même manière, mais en fonction de différentes charges dans la plate-forme. Des différences ont été notées à chacune des étapes.

La flèche est positionnée à l'horizontal et déployée de 16 mètres. À vide, la plate-forme est située à 100 centimètres du sol. Avec une masse de 86 kilogrammes dans la plate-forme, celle-ci est située à 89 centimètres et lorsqu'on ajoute une masse supplémentaire de 118 kilogrammes qui forme une masse combinée de 204 kilogrammes, la plate-forme se situe à 72 centimètres du sol.

Essais techniques

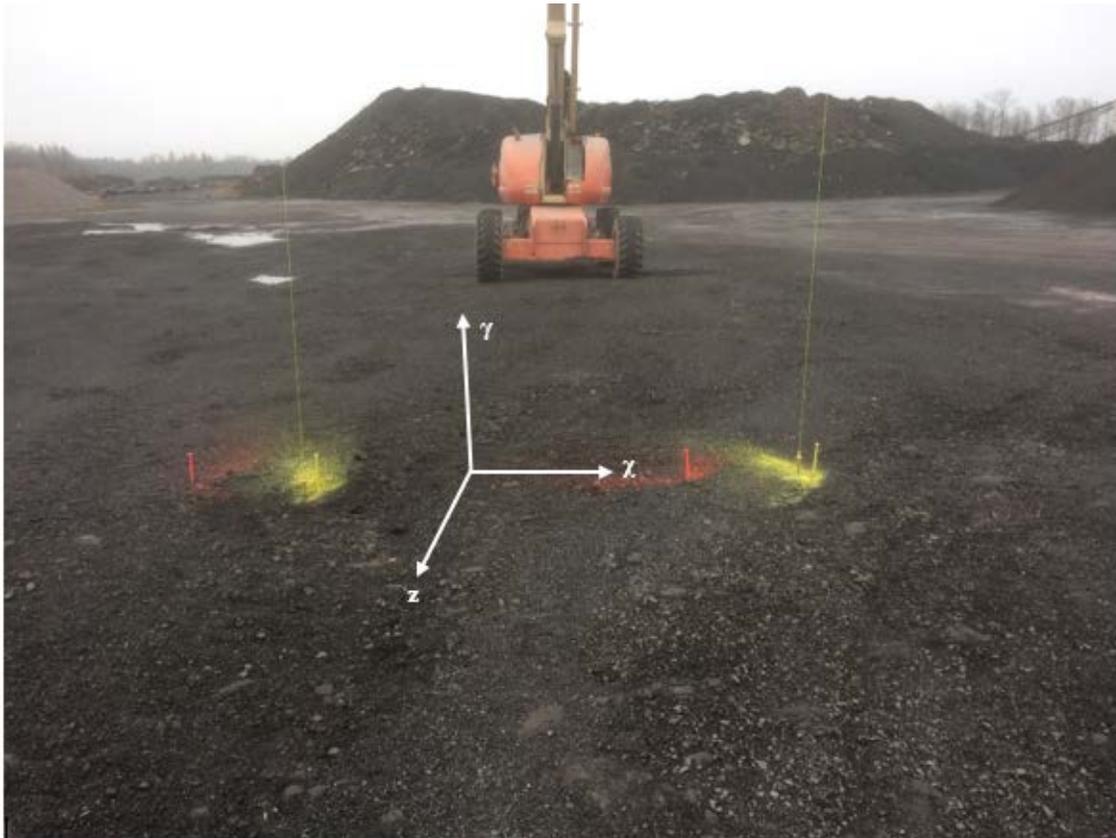
Ces essais permettaient de constater les déplacements et les vitesses des axes de la plate-forme et de la flèche de l'appareil de levage dans différents scénarios. Ceux-ci ont eu lieu au Centre de formation en mécanique de véhicules lourds de la Commission scolaire des Navigateurs (CSDN). Nous avons utilisé une machine appartenant à Mortier en Trémie ABL inc. Celle-ci a par ailleurs celle-ci a été modifiée afin qu'elle soit opérée sécuritairement à partir du sol. Un professeur et formateur certifié en appareil de levage de la CSDN l'a opéré. Des vidéos ont été prises sur les lieux. Des déplacements ont pu être observés au niveau de la plate-forme et de la flèche.

Effet de la cavité sur le déplacement de la plate-forme

Cet essai avait pour objectif de mesurer l'effet de la cavité au niveau de la plate-forme. L'état de la surface de roulement a été reproduit (voir point 4.3). Les pneus ont été ajustés à la même pression d'air qu'au moment de l'accident (voir point 4.4). La plate-forme est en hauteur et la flèche sont déployées selon les paramètres recueillis au moment de l'accident. Des données ont été prises au niveau du sol avec la roue motrice gauche de l'appareil de levage alors que celle-ci s'est engagée dans la cavité. Des mesures ont été recueillies à la suite des déplacements de la plate-forme au niveau de ses axes.

D'abord, un marquage au sol et au niveau du flanc du pneu de la roue motrice gauche a été fait. Par la suite, des fils ont été attachés à des plombs puis ils ont été suspendus au plancher au niveau des coins opposés de la plate-forme. Ensuite, l'appareil de levage a été positionné selon les mêmes paramètres lors de l'accident. La flèche est déployée de 16 m et la plate-forme située à 11 m du sol. Les pneus ont été ajustés à la même pression d'air (voir point 4.4). Vis-à-vis les plombs, des marques au sol ont été faites (couleur orange).

La plate-forme élévatrice a été reculée afin de reproduire la cavité (voir point 4.3). Par la suite, par à-coup, l'appareil de levage a avancé afin que la roue motrice avant gauche soit positionnée dans la cavité. En fonction du déplacement, les plombs se sont placés différemment et du marquage au sol a été fait (couleur jaune). Donc, la plate-forme s'est déplacée vers le bas axe Y de 35 cm (voir photo ci-dessous), latéralement axe X de 65 cm, puis un mouvement avant axe Z de 8 cm.



(Source : CNESST)

Photo 7 : Effet de la cavité sur le déplacement de la plate-forme

ANNEXE D

Rapport d'expertise

Expertise sur les forces nécessaires à l'éjection d'un travailleur d'une plate-forme

réalisée pour la
Direction régionale de Chaudière-Appalaches de la
Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST)

par

Jean Ruel, ing., Ph.D.
Professeur titulaire
Département de génie mécanique de l'Université Laval

20 décembre 2019

Introduction

Ce rapport est la réalisation d'un mandat qui m'a été confié le 7 novembre 2019 par la Direction régionale de Chaudière-Appalaches de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). Il concerne un accident au cours duquel un travailleur qui prenait place à bord d'une plate-forme élévatrice a été victime d'une chute de plus de 11 mètres.

Le mandat était décrit dans un document intitulé « DEMANDE DE SOUMISSION - Expertise sur les forces nécessaires à l'éjection d'un travailleur d'une nacelle » produit par la Direction régionale de Chaudière-Appalaches de la CNESST. Un autre document contenant des informations complémentaires et des photos de l'accident m'a aussi été envoyé par Monsieur Yannick Boutin par courriel le 5 novembre 2019 (référence [1]). Finalement, plusieurs photographies de la scène de l'accident et des films d'expérimentations réalisées par la CNESST m'ont aussi été fournis.

Le mandat d'expertise comportait les six éléments suivants :

- 1) Évaluer les forces nécessaires à l'éjection du travailleur dans les conditions de l'accident, afin de répondre aux deux questions suivantes : a) est-ce que la plate-forme produit une force nécessaire pour éjecter l'opérateur et les outils ? b) Comment la plate-forme réagit-elle ?
- 2) Expliquer sommairement l'effet « trampoline » pour un travailleur installé sur la plate-forme lors du déplacement de celle-ci, et évaluer si l'effet trampoline ou l'effet de fouettement de la plate-forme produit une force suffisante pour éjecter l'opérateur et les outils.
- 3) Expliquer l'effet des 3 mouvements simultanés (axe des X, Y et Z) sur l'opérateur.
- 4) Expliquer l'effet ou l'impact des pneus dégonflés sur la plate-forme lors de son passage dans la cavité de 7,6 cm de profond et la flèche déployée de 16 mètres.
- 5) Analyser la différence entre le passage d'une roue motrice avant et le passage d'une roue arrière dans une cavité de 7,6 cm sur la plate-forme, lorsque la flèche est déployée de 16 mètres.
- 6) Conclure si le travailleur a été catapulté ou éjecté de la plate-forme et pourquoi.

Le présent rapport répond aux points énumérés ci-dessus.

Évaluation de la dynamique des éléments mécaniques impliqués dans l'accident

Afin d'étudier la dynamique de la plate-forme élévatrice et de ses composantes, un modèle a dû être établi (figure 1) afin d'en connaître les caractéristiques massiques et géométriques, notamment la position des centres de masse et les moments d'inertie des principales composantes.

Dans ce rapport, la terminologie suivante sera utilisée : le terme flèche désigne le bras extensible qui supporte la plate-forme munie de gardes de sécurité dans laquelle prend place le travailleur. Le véhicule est constitué de deux composantes principales : le châssis auquel sont reliés les essieux et les roues, et la table tournante, qui permet la rotation autour d'un axe vertical et qui comprend le moteur. La flèche est fixée à la table tournante. Les termes plate-forme élévatrice et machine désignent l'ensemble complet, c'est-à-dire le châssis, la table tournante, la flèche et la plate-forme.

Certaines informations étaient disponibles dans les documents qui m'ont été fournis. J'ai par ailleurs dû évaluer plusieurs données dimensionnelles sur des figures et des photographies, en les mesurant et en appliquant des facteurs d'échelle à partir des dimensions connues. La figure 2-1 du manuel d'utilisation (référence [3], page 2-9) a été utilisée à cet effet. Les propriétés de masse données dans le manuel d'entretien du fabricant au tableau 1-30 (référence [2], page 1-7) ont été utilisées comme références pour les masses. La plate-forme a été divisée en ses composantes principales, et chaque composante a été modélisée avec un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) selon les dimensions fournies et relevées, et en respectant les masses données au tableau 1-30 [2]. La plate-forme a été modélisée dans sa configuration au moment de l'accident. Ce modèle sera désigné par l'appellation « modèle CAO » dans la suite de ce document.

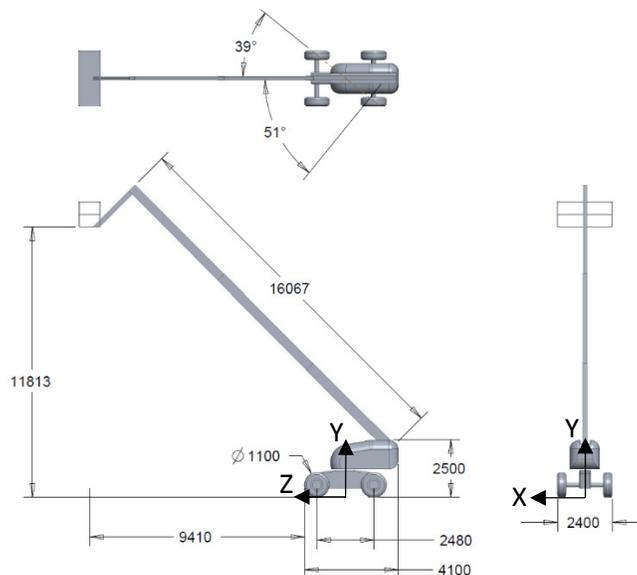


Figure 1. Modèle CAO, dimensions indiquées en mm

Calcul du mouvement de la plate-forme

L'orientation du système d'axes des figures 1 et 2 est la même que celle présentée dans la référence [1], page 5. L'axe X est orienté latéralement, l'axe Y verticalement et l'axe Z longitudinalement. L'origine du système d'axe est située au sol, au centre géométrique du rectangle formé par les points de contacts des 4 roues. À partir du modèle CAO, la position du centre de masse par rapport au système de coordonnées de la figure 1 a été calculée aux coordonnées $X = 0$ et $Z = 439$ mm.

La figure 2 montre une vue de dessus du châssis de la base de la machine, ainsi que la position du centre de masse (point jaune identifié C.M.) de la machine complète par rapport aux roues dans sa configuration au moment de l'accident, c'est-à-dire avec la flèche déployée. On peut y remarquer que le centre de masse est situé vers l'avant (par rapport à une position médiane), du fait que la flèche était déployée vers l'avant. Une ligne reliant la roue arrière gauche et la roue avant droite a été tracée, et on peut constater que le centre de masse se trouve à gauche de cette ligne. S'il n'y a pas de point d'appui sous la roue avant gauche, la machine effectue une rotation dans cette direction, en tournant autour de l'axe reliant la roue arrière gauche et la roue avant droite. Une telle rotation s'est produite au moment de l'accident, lorsque la roue avant gauche s'est engagée dans la cavité de 7.6 cm de profondeur. Dans ce qui suit, le terme axe de rotation fait référence à cet axe reliant la roue arrière gauche et la roue avant droite.

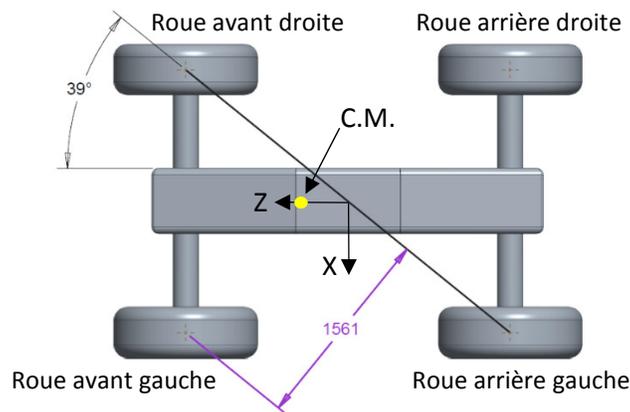


Figure 2. Vue de dessus du châssis et position du centre de masse au moment de l'accident

La vitesse longitudinale (axe Z) à laquelle se déplaçait la plate-forme lors de l'accident est inconnue, au moment où la roue motrice avant gauche s'est engagée dans une cavité de 7.6 centimètres de profondeur [1]. Cependant, des photographies du terrain ont permis de constater que la cavité était très localisée dans l'espace. Des films de simulations réalisées par la CNESST dans une cavité comparable ont permis d'évaluer que le temps de descente dans cette cavité était de l'ordre de 0.2 à 0.25 sec.

Utilisant une valeur de 0.25 secondes comme temps de descente, la vitesse verticale de descente de la roue dans la cavité est:

$$V_y = y / t = 0.076 \text{ m} / 0.25 \text{ s} = 0.304 \text{ m/s}$$

Sur la figure 2, un segment de droite représente la longueur du rayon entre l'axe de rotation et le point de contact de la roue avant gauche. La longueur de ce rayon est de 1.56 m.

La descente de la roue avant gauche dans la cavité provoque une rotation de la machine autour de l'axe reliant la roue arrière gauche et la roue avant droite. La vitesse angulaire correspondant à ce mouvement, c'est-à-dire à une vitesse verticale de descente de la roue de 0.304 m/s est :

$$\omega = V_y / r = 0.304 \text{ m/s} / 1.56 \text{ m} = 0.195 \text{ rad/s}$$

Au moment où la roue atteint le fond de la cavité, il est plausible de supposer que la plate-forme élévatrice s'est arrêtée brusquement. Afin d'évaluer ce qui s'est produit à ce moment, une modélisation physique et mathématique est requise.

La plate-forme élévatrice dans son ensemble est un système complexe à plusieurs degrés de liberté dont l'analyse demanderait la détermination d'un grand nombre de paramètres, qui nécessiteraient chacun plusieurs hypothèses et mesures expérimentales. Puisqu'il y a de toute façon des inconnues importantes concernant les circonstances de l'accident, une approche simplifiée est de mise.

Le système sera analysé par sous-ensembles. La flèche et la plate-forme seront considérées comme un système du deuxième ordre comportant des masses, des rigidités ainsi qu'un amortissement interne. La flèche sera considérée comme une poutre dotée d'une certaine élasticité, d'une masse distribuée sur sa longueur et d'un certain amortissement interne. La plate-forme, le travailleur et les outils seront considérés dans ce contexte comme une masse ponctuelle située au bout de la flèche. Les différents éléments qui relient entre elles toutes les pièces de la flèche et de la plate-forme, comme les vérins, écrous, joints, fils électriques et boyaux hydrauliques, contribuent également en tant que masses distribuées et à l'amortissement du système.

Une expérience concernant la rigidité de la flèche a été réalisée par la CNESST préalablement à mon expertise, référence [1]. Dans cette expérience, la flèche a été placée en extension de 16 m, élongation mesurée lors de l'accident, mais en position horizontale. Deux charges successives ont ensuite été appliquées à la plate-forme, et la déflexion a été mesurée. Le graphique de la figure 3 présente ces résultats.

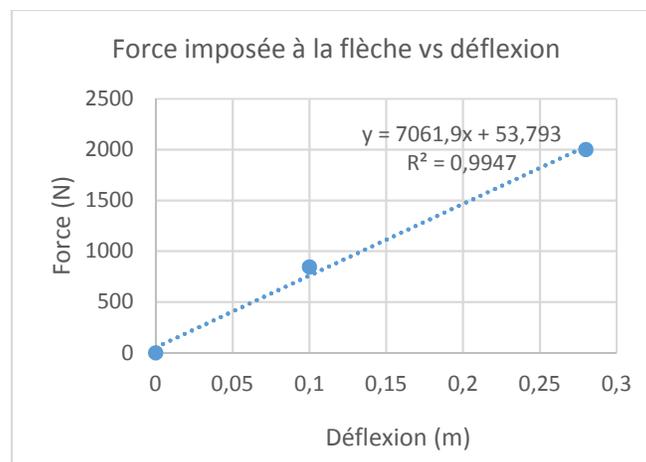


Figure 3. Rigidité de la flèche obtenue par expérimentation de la CNESST

Ces mesures permettent de déterminer la rigidité de la flèche qui sera considérée comme une poutre. Celle-ci est la pente de la droite de la figure 3, c'est-à-dire $k = 7062 \text{ N/m}$. Noter qu'il s'agit de la rigidité verticale, c'est-à-dire lorsqu'une force est appliquée verticalement. La section de la flèche est moins large que haute. La rigidité latérale est donc moindre.

En ce qui concerne l'amortissement, sa quantification sera abordée plus loin. Ce qu'il importe de mentionner ici est que dans un système où l'amortissement est faible, une perturbation, c'est-à-dire une variation brusque des conditions aux limites, provoque l'oscillation du système pendant un certain temps. Dans le cas de la plate-forme élévatrice, l'oscillation est un déplacement de la plate-forme au bout de la flèche, c'est-à-dire une déflexion alternée de l'extrémité de la flèche. Le mouvement se fait dans deux directions principales, soit verticalement et latéralement. Les essais expérimentaux réalisés par la CNESST et mentionnés ci-dessus ont permis de constater que l'amortissement de la flèche est très faible. Il y a donc plusieurs oscillations résiduelles lorsqu'une perturbation est subie par la flèche, comme un freinage, une cavité, une bosse ou une accélération.

Dans l'analyse du mouvement, qui a constitué en une rotation de la machine suite à l'engagement de sa roue avant gauche dans la cavité, suivi de son arrêt, l'énergie du système est l'énergie cinétique due à son déplacement longitudinal et à sa rotation, et cette énergie doit être dissipée lors de l'arrêt. Un travailleur se trouvant à bord de la plate-forme ressent à ce moment une force lors du freinage initial, suivie de forces alternées d'intensité décroissante résultant des aller-retours lors de l'oscillation de la plate-forme, jusqu'à ce que celle-ci s'immobilise, s'il n'y a pas de nouvel apport d'énergie au système.

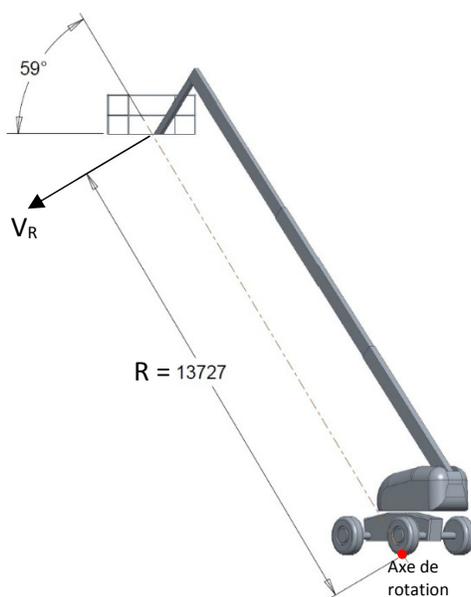


Figure 4. Vue auxiliaire avec axe de rotation vu comme un point

Au moment de l'arrêt de la plate-forme dans la cavité, celle-ci possédait une vitesse angulaire autour de l'axe de rotation se traduisant en une vitesse latérale V_x , une vitesse verticale V_y , ainsi qu'une vitesse longitudinale V_z .

Afin d'évaluer la vitesse due à la rotation autour de l'axe reliant la roue arrière gauche et la roue avant droite, la longueur du segment de droite reliant perpendiculairement la plate-forme (son plancher) à l'axe de rotation fut obtenue à l'aide du modèle CAO, tel que présenté sur la figure 4. La distance de l'axe de rotation au centre de la plate-forme est de 13.73 m, et la vitesse correspondante de la plate-forme V_R due à la rotation et tangentielle à la trajectoire est

$$V_R = \omega R = 0.195 \text{ rad/s} \times 13.73 \text{ m} = 2.68 \text{ m/s}$$

Les composantes de cette vitesse due à la rotation selon le système d'axes XYZ sont les suivantes:

$$V_x = 2.68 \text{ m/s} \times \cos 31^\circ \times \sin 51^\circ = 1.78 \text{ m/s}$$

$$V_y = -2.68 \text{ m/s} \times \sin 31^\circ = -1.38 \text{ m/s}$$

$$V_z = 2.68 \text{ m/s} \times \cos 31^\circ \times \cos 51^\circ = 1.45 \text{ m/s}$$

Considérant la vitesse verticale de la plate-forme V_y qui est vers le bas et d'une intensité de 1.38 m/s, cette composante à elle seule a pu déstabiliser le travailleur. En effet, si le mouvement fut brusque, ce qui est probablement le cas, et qu'il a duré 0.25 secondes, le travailleur a pu ressentir que le plancher de la plate-forme semblait se dérober sous ses pieds. En effet, avec une accélération vers le bas de $9,81 \text{ m/s}^2$ en chute libre, et considérant une vitesse vers le bas nulle au début du mouvement, sa vitesse aurait été de 2.2 m/s après 0.25 secondes s'il avait été en chute libre. Le poids apparent du travailleur s'est donc trouvé diminué par la vitesse de descente, et par voie de conséquence, il en fut de même de la fermeté de son appui sur la plate-forme, par réduction du frottement. Les déplacements latéral et longitudinal simultanés à ce déplacement vertical ont ajouté à l'effet déstabilisant.

Déplacements de la plate-forme

Les déplacements de la plate-forme suivent les mêmes projections trigonométriques que les vitesses. L'angle de rotation est d'abord calculé par l'équation

$$\tan \theta = (0.076 \text{ m} / 1.56 \text{ m}), \text{ donc } \theta = 2.79^\circ = 0.0487 \text{ radian}$$

Puis les déplacements sont calculés :

$$\delta_x = \theta R \times \cos 31^\circ \times \sin 51^\circ = 0.0487 \text{ radian} \times 13.73 \text{ m} \times \cos 31^\circ \times \sin 51^\circ = 0.45 \text{ m}$$

$$\delta_y = \theta R \times \sin 31^\circ = -0.344 \text{ m}$$

$$\delta_z = \theta R \times \cos 31^\circ \times \cos 51^\circ = 0.36 \text{ m}$$

Ces valeurs sont cohérentes, bien que différentes, avec l'expérimentation réalisée par la CNESST et rapportées dans la référence [1] : $\delta_x = 0.65 \text{ m}$, $\delta_y = -0.35 \text{ m}$ et $\delta_z = 0.08 \text{ m}$.

Le déplacement global calculé à partir des valeurs ci-dessus ($\delta_x = 0.45 \text{ m}$, $\delta_y = -0,344 \text{ m}$ et $\delta_z = 0.36 \text{ m}$) est 0.67 m.

Forces dues à la décélération lors de l'arrêt

Nous procéderons maintenant au calcul des forces de décélération suivant un arrêt brusque.

L'arrêt de la plate-force produit des forces inertielles qui peuvent déstabiliser, et même projeter le travailleur s'il est brusque et soudain. Ces forces sont d'autant plus grandes que le temps de décélération est court. Il est possible d'observer sur les films enregistrés lors des essais expérimentaux réalisés par la CNESST que ce temps d'arrêt peut effectivement être très court.

Tout comme la descente dans la cavité, le freinage a dû se produire en moins d'une seconde lors de l'accident. Pour un temps de décélération de 0.5 sec et une vitesse initiale de 2.68 m/sec, la décélération se produit à un taux de -5.4 m/s^2 , c'est-à-dire à environ 0.55 g, g étant l'accélération gravitationnelle (9.81 m/s^2). La référence [4], une étude sur les décélération acceptables dans les transports publics rapporte qu'à partir de 0.165 g les passagers se tenant debout sont déstabilisés et doivent se tenir à un garde avec la main pour ne pas tomber. La valeur stable lorsqu'un passager se tient à un garde ou à un poteau vertical est de 0.27 g. Même en considérant un temps de 0.5 seconde, l'accélération correspondante d'environ 0.55 g est plus que suffisante pour déstabiliser un travailleur : il se sent à ce moment projeté avec une force équivalente à plus de la moitié de son propre poids dans la direction du mouvement. Lors de la décélération, le travailleur et les outils poursuivent leur trajectoire alors que la plate-forme change brusquement de vitesse et de direction. On peut remarquer que les trois composantes de vitesse calculées ci-dessus, V_x , V_y et V_z , sont significatives. Entre autres, la vitesse verticale V_y de -1.38 m/s est dirigée vers le bas. La plate-forme subit donc lors de sa rotation une accélération angulaire qui contribue à diminuer le poids ressenti par le travailleur et contribue à diminuer sa stabilité, tel qu'évoqué ci-dessus. C'est donc ce changement brusque de mouvement de la plate-forme par rapport au travailleur qui produit un changement de mouvement relatif pouvant résulter en une déstabilisation, ainsi qu'à une projection.

En réalité, le temps de décélération a pu être encore plus court et les forces encore plus grandes, probablement de l'ordre de 1 g, et même peut-être plus. Il est raisonnable de considérer que l'arrêt soudain a pu se produire en 0.25 seconde ou moins.

La force inertielle est donc vraisemblablement suffisante pour projeter un travailleur avec une grande intensité sur les gardes de la plate-forme. Tout dépendant de sa posture et de la position de son centre de masse, il est possible qu'il ait pu basculer par-dessus le garde. Le mouvement vertical vers le bas de la plate-forme a également pu contribuer au passage et au basculement du travailleur par-dessus le garde. Lors de ces mouvements, les outils peuvent aussi avoir été projetés avec une force pouvant égaler ou même dépasser leur propre poids.

Cette analyse concerne le mouvement résultant du freinage initial, or il a été mentionné ci-dessus que l'amortissement de la flèche observé lors d'essais expérimentaux réalisés par la CNESST était faible. En effet, lorsque soumise à une perturbation, il a été observé que la plate-forme oscille pendant un temps important. Ce phénomène sera maintenant analysé.

La fréquence naturelle amortie ω_d d'un système du deuxième ordre dépend de la masse m , de la rigidité k et du coefficient d'amortissement ζ selon la relation suivante [5] :

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{(1 - \zeta^2)}$$

La fréquence naturelle amortie ω_d de la flèche a pu être évaluée à partir des essais expérimentaux réalisés par la CNESST, ce qui a permis par la suite d'évaluer le coefficient d'amortissement ζ . L'observation des films des essais ont permis de déterminer que la fréquence naturelle amortie se situait entre 0.7 et 0.8 Hz. Lors de ces mêmes essais, la masse de la plate-forme et de ses occupants était de 340 kg. La rigidité verticale de la flèche était similaire à celle impliquée dans l'accident. Noter que la rigidité latérale n'a pas été évaluée mais que celle-ci est moindre que la rigidité verticale car la section de la poutre est moins large que haute.

Pour un système qui présente un faible amortissement, la fréquence naturelle amortie ω_d est très voisine de la fréquence naturelle non-amortie ω_n exprimée par

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Si l'on calcule la fréquence naturelle non-amortie ω_n du système constitué de la plate-forme et de la flèche avec les paramètres $k = 7062$ N/m et $m = 340$ kg, on obtient 4.56 rad/s, c'est-à-dire 0.73 Hz, ce qui est en accord avec les fréquences observées lors des essais et se situant entre 0.7 et 0.8 Hz. Le coefficient d'amortissement ζ a ensuite été évalué en observant le mouvement oscillant de la plate-forme et en le comparant au mouvement de vibration libre théorique d'un système du deuxième ordre.

Lorsqu'un système du deuxième ordre subit une perturbation, son déplacement (noté x) en fonction du temps (noté t) suite à la perturbation est décrit par l'équation suivante [5,8] :

$$x(t) = A e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi_d)$$

avec

$$A = \sqrt{x_o^2 + \left(\frac{\dot{x}_o + \zeta\omega_n x_o}{\omega_d}\right)^2} \quad \text{et} \quad \phi_d = \tan^{-1}\left(\frac{x_o\omega_d}{\dot{x}_o + \zeta\omega_n x_o}\right)$$

Et où x_o est le déplacement initial suite à la perturbation et \dot{x}_o est la vitesse initiale suite à la perturbation. Ces deux valeurs ont été déterminées à partir des valeurs calculés ci-dessus pour la rotation autour de l'axe reliant la roue arrière gauche et la roue avant droite, soit un déplacement initial de 0.67 m et une vitesse de 2.68 m/s. Par contre, puisque la flèche était en position basse lors des essais, un facteur de réduction correspondant au rapport du rayon de rotation en position basse, évalué à $16 \text{ m} \times \sin 39^\circ = 10.97 \text{ m}$ (référant à l'angle indiqué sur la figure 2) par rapport au rayon de 13.73 m avec la flèche en hauteur. Les valeurs utilisées dans le modèle étaient donc où $x_o = 0.54 \text{ m}$ et $\dot{x}_o = 2.14 \text{ m/s}$.

Le graphique de la figure 5 présente la réponse calculée de la plate-forme à cette perturbation initiale, dans les conditions correspondant aux essais expérimentaux réalisés par la CNESST.

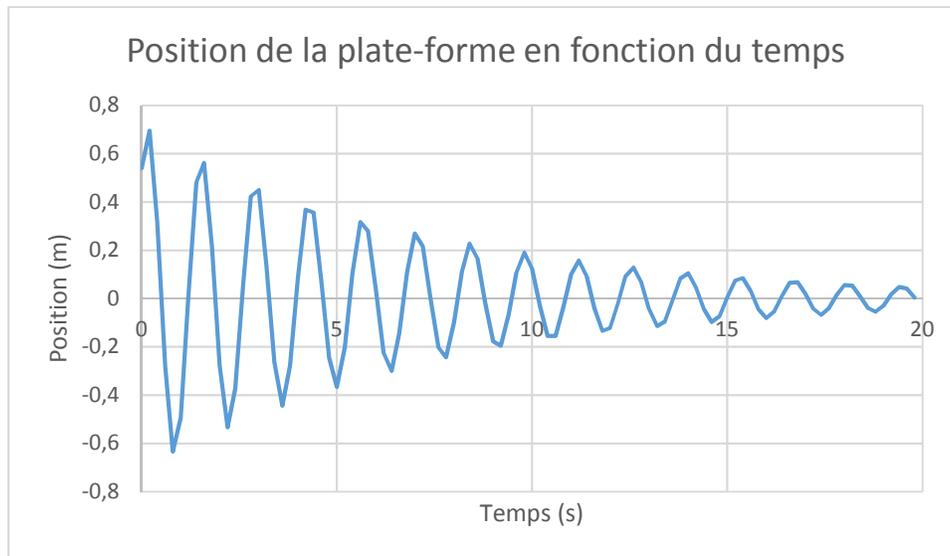


Figure 5. Réponse de la plate-forme à une perturbation produite par le passage de la roue avant gauche dans une cavité de 7.6 cm, conditions lors de l'expérience de la CNESST.

Dans le graphique ci-dessus, le coefficient d'amortissement a été ajusté de façon à ce que les oscillations correspondent à ce qui pouvait être observé sur les films, c'est-à-dire le fait qu'il restait une oscillation réduite mais non-négligeable après 14 cycles et 18 secondes. Cette valeur a été évaluée à $\zeta \approx 0.03$.

À titre d'exemple comparatif, la référence [5] présente un coefficient d'amortissement aussi faible que $\zeta = 0.01$ pour une poutre d'acier continue vibrant sur des appuis simples permettant la rotation. Par ailleurs, la référence [6] présente un coefficient d'amortissement $\zeta = 0.2$ pour une structure constituée d'un ensemble de poutres d'acier. L'amortissement significativement plus important dans ce cas par rapport à une poutre seule vient du fait que les poutres d'une telle structure sont généralement boulonnées et que les joints, où se produisent de la dissipation et du frottement, contribuent à l'amortissement. La dynamique du mouvement qui a pu être observée pour la flèche de la plate-forme a démontré un amortissement se rapprochant davantage de celui d'une poutre d'acier, avec une valeur de $\zeta \approx 0.03$.

Avec ces valeurs et les hypothèses énoncées ci-dessus, il est maintenant possible de modéliser le mouvement de la plate-forme lors de l'accident. À ce moment, la masse de la plate-forme, du travailleur et de ses outils était de 278 kg. La fréquence naturelle amortie est donc

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} \sqrt{1 - \zeta^2}} = \sqrt{\frac{7062 \text{ N/m}}{278 \text{ kg}} \sqrt{1 - 0.03^2}} =$$

$$5.04 \text{ radians/s} = 0.80 \text{ Hz}$$

Cette fréquence signifie que la plate-forme fait un aller-retour en 1.25 secondes, ce qui implique un changement de sens du mouvement à chaque 0.63 seconde. On peut imaginer qu'un opérateur se trouvant dans la plate-forme qui oscille à cette fréquence soit déstabilisé. La figure 6 présente la réponse de la plate-forme à la perturbation correspondant à la cavité de 7.6 cm.

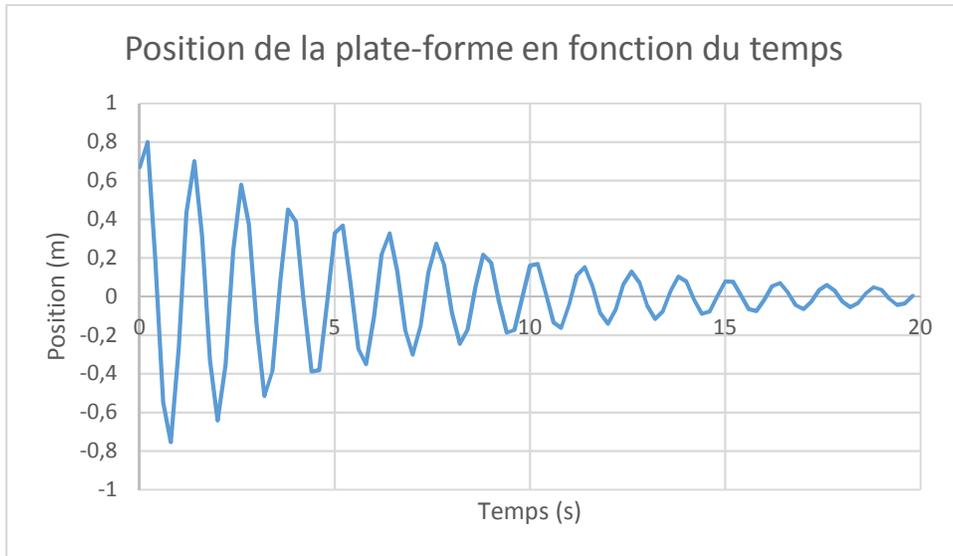


Figure 6. Réponse de la plate-forme à une perturbation produite par le passage de la roue avant gauche dans une cavité de 7.6 cm, conditions lors de l'accident.

On peut également remarquer sur la figure 6 l'amplitude importante du mouvement. Au début, cette amplitude est de l'ordre de 1.5 m.

Effet trampoline

L'effet trampoline réfère au rebondissement et à l'amplification d'un mouvement oscillatoire lorsqu'il y a un apport régulier d'énergie à un système tel que celui décrit ci-dessus. Dans le cas d'une trampoline, le sauteur apporte à chaque bond une quantité d'énergie par la poussée qu'il exerce avec les muscles de ses jambes, ce qui lui permet de maintenir le rebondissement, et même de l'augmenter, dans la mesure de ses capacités musculaires. Dans le cas d'un travailleur se trouvant à bord d'une plate-forme élévatrice, l'apport d'énergie dans le système se fait à la base du véhicule, lorsque que celui-ci se déplace à une certaine vitesse et que les roues rencontrent périodiquement dans des irrégularités au sol, qu'il s'agisse de bosses ou de cavités. Ces irrégularités constituent des perturbations qui apportent de l'énergie au système et provoquent des oscillations de la plate-forme.

Si la plate-forme rencontre des irrégularités de façon répétée, il est possible que de nouvelles impulsions vibratoires soient imposées au système avant que ne soit dissipée l'énergie fournie par la perturbation précédente, et qu'il y ait ainsi amplification du mouvement, d'où l'effet trampoline qui peut être ressenti par le travailleur se trouvant dans la plate-forme.

Pour un système du deuxième ordre subissant une excitation régulière provenant de la base, l'amplification d'un mouvement produit par rapport à celui de sa base s'exprime par l'équation [5,8] :

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2}{(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2}}$$

$$\text{ou } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Dans cette équation, Y est le mouvement produit par la perturbation à la base pour une basse fréquence, X est le mouvement amplifié en fonction de la fréquence ω de l'excitation du système par sa base, et ω_n est la fréquence naturelle non amortie du système.

Dans le cas de la plate-forme élévatrice à l'étude, le mouvement à très basse fréquence peut être déterminé comme suit, référant à la figure 1. Nous devons déterminer ce que sera le mouvement de la plate-forme pour un mouvement donné de la base. Considérons l'exemple à l'étude, soit une cavité de 0.076 m. Il a déjà été déterminé précédemment que le fait d'entrer dans une telle cavité produit un déplacement vertical de la plate-forme

$$\delta_y = \theta R \times \sin 31^\circ = -0.34 \text{ m}$$

Du simple fait de la géométrie de la plate-forme avec la flèche déployée, il y a déjà une amplification d'un mouvement à la base de $0.034 \text{ m} / 0.0076 \text{ m} = 4.47$. Ceci veut dire que même pour un mouvement très lent, le mouvement vertical de la plate-forme est d'une amplitude 4.47 fois plus grande que le mouvement à sa base, soit celui de la roue avant.

Considérons maintenant l'effet trampoline, lorsque que le véhicule se déplace et qu'il y a apport régulier d'énergie au système. Dans l'équation ci-dessus permettant de calculer le facteur d'amplification dynamique X/Y, plus la valeur de ζ est faible, plus grand est ce facteur d'amplification. Or il a été évalué que ce facteur d'amplification était de l'ordre de $\zeta = 0.03$.

Le graphique de la figure 5 présente le facteur d'amplification dynamique X/Y en fonction de la fréquence ω de l'excitation du système par sa base, pour une valeur de $\zeta = 0.03$. Noter que l'axe X est normalisé en divisant la fréquence d'excitation ω par la fréquence naturelle non amortie ω_n du système.

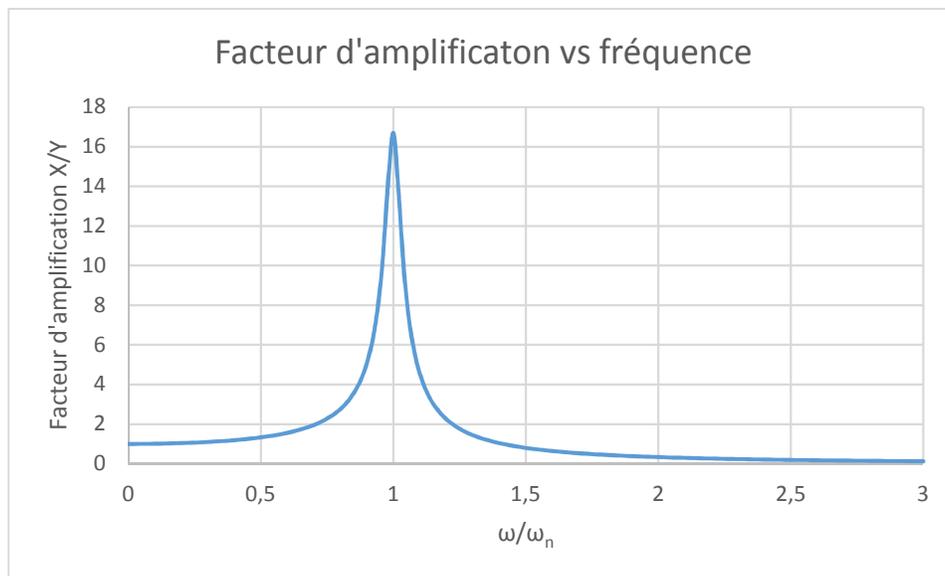


Figure 5. Facteur d'amplification dynamique X/Y en fonction de la fréquence normalisée ω/ω_n .

On peut remarquer qu'il y a amplification du mouvement pour des valeurs de ω/ω_n allant d'environ 0.5 à 1.25. En termes physiques, avec

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{7062 \text{ N/m}}{278 \text{ kg}}} = 5.04 \text{ radians/s} = 0.80 \text{ Hz}$$

cette plage de fréquences correspond à 0.4 à 1 Hz, ce qui équivaut à une perturbation à toutes les 1 à 2.5 secondes. On peut remarquer qu'à la fréquence naturelle, le facteur d'amplification est très grand, une conséquence du faible facteur d'amplification $\zeta = 0.03$. À la fréquence naturelle le facteur d'amplification est à son maximum, c'est-à-dire $X/Y = 16.7$.

Ceci illustre le fait que puisqu'une perturbation prend du temps à s'amortir, comme en témoignent les essais expérimentaux de la CNESST et que l'illustre graphiquement la figure 6, un apport répété d'énergie au système produit une amplification très importante du mouvement de la plate-forme.

J'ai pu constater sur les photographies du lieu de l'accident que le terrain était très irrégulier, et qu'en se déplaçant, la plate-forme élévatrice subissait effectivement des perturbations pouvant s'additionner, et il est fort probable qu'elle possédait déjà un certain mouvement oscillant lorsque sa roue avant gauche s'est engagée dans la cavité de 7.6 cm où se termina son mouvement.

J'ai également pu constater, sur les films des essais expérimentaux réalisés par la CNESST, que lors de la mise en mouvement de la machine, une impulsion était donnée au système et provoquait une oscillation de la plate-forme. Un avancement par à-coups de la machine peut donc contribuer à l'augmentation de l'énergie vibratoire.

Sur ces films, réalisés alors que la flèche est en extension mais en position basse, c'est-à-dire parallèle au sol, l'amplitude des déplacements est importante, de l'ordre du mètre et même davantage. Lorsque la flèche est en position élevée, elle se trouve à un rayon encore plus grand de l'axe de rotation, et les déplacements et vitesses qui résultent sont d'autant plus importants.

Considérations sur l'énergie

Une approche complémentaire consiste à calculer l'énergie du système lors du mouvement de pivotement de la plate-forme lorsque sa roue avant gauche s'engage dans la cavité.

Afin d'évaluer cette énergie, un système d'axe a été créé à la base de la flèche dans le modèle CAO, avec un axe Z' aligné à l'axe de rotation. Le moment d'inertie $I_{zz'}$ de la flèche et de la plate-forme selon cet axe a été calculé.

L'énergie cinétique de la flèche et de la plate-forme autour de cet axe et à cette vitesse de rotation est :

$$E = \frac{1}{2} I_{zz'} \omega^2 = \frac{1}{2} (1.45 \times 10^5 \text{ kg.m}^2) (0.195 \text{ rad/s})^2 = 2757 \text{ J}$$

Cette énergie cinétique est l'énergie de rotation de la flèche, de la plate-forme, du travailleur et de ses outils. Cette énergie est ensuite majoritairement emmagasinée dans la déformation élastique de la flèche, et produit les oscillations subséquentes de celle-ci. Cette énergie est

également disponible pour qu'une fraction soit transférée au travailleur et à ses outils, lors d'une éventuelle projection.

Le travailleur mesurait 1.73 m et présentait une masse de 100 kg. Les gardes présentaient une hauteur de 1.09 m. Considérant que son centre de masse était situé à la hauteur des gardes, où à une hauteur légèrement inférieure, il est plausible de supposer qu'une élévation de 0.3 m du travailleur était suffisante pour qu'une éventuelle projection ait été suivie d'un basculement par-dessus le garde. Or le gain d'énergie potentielle correspondant à une élévation du travailleur de 0.3 m est de 300 J, soit environ 10% de l'énergie contenue dans la flèche et la plate-forme. Les éléments supportant le travailleur possédaient donc amplement d'énergie pour communiquer un tel mouvement au travailleur.

Les outils présentaient une masse de 38 kg. Ils ont pu être projetés par une petite fraction de l'énergie contenue dans la flèche et la plate-forme au moment de l'accident.

Le mouvement initial de descente de la roue dans la cavité et d'arrêt de la plate-forme a produit un mouvement et des forces importantes risquant de déstabiliser et projeter le travailleur. Les oscillations subséquentes ont également pu contribuer significativement à augmenter la déstabilisation et la projection du travailleur.

Effet des pneus dégonflés sur la plate-forme lors de son passage dans la cavité

Le fait que le pneu ait été dégonflé lorsqu'il s'est engagé dans la cavité de 7.6 cm de profondeur avec la flèche déployée à 16 mètres n'a probablement pas eu beaucoup d'effet sur la dynamique de la flèche et de la plate-forme. Par contre, la plate-forme dans son entièreté n'était peut-être pas au niveau à cause du gonflement non-homogène des pneus, et le travailleur se trouvait peut-être déjà sur une surface présentant un certain angle au moment de l'accident, ce qui n'était évidemment pas une situation souhaitable lorsque se sont produits les mouvements dynamiques.

En ce qui concerne la dynamique de la plate-forme dans son ensemble, bien que la partie motrice de la machine, constituée du châssis et de la table-tournante, agisse plutôt comme une base lourde et rigide pour la flèche, elle est néanmoins dotée de ses propres caractéristiques dynamiques, même si la partie la plus souple et la plus susceptible de vibrer est sa flèche. Si toutefois nous souhaitons considérer la dynamique de la base, l'effet d'un pneu dégonflé serait principalement d'augmenter l'amortissement de cette partie de la machine, ce qui par rapport à un pneu gonflé davantage et plus rigide, aurait un effet amortissant, c'est-à-dire celui d'atténuer les oscillations plutôt que de les augmenter.

Par ailleurs, le pneu dégonflé a pu contribuer à une maniabilité sous optimale de la machine lors de ses déplacements et à un temps de réponse moins favorable, lors des virages par exemple, mais en ce qui concerne la vibration de la plate-forme, je pense que son influence est moindre.

Analyse de la différence entre le passage d'une roue motrice avant et le passage d'une roue arrière dans une cavité lorsque la flèche est déployée de 16 mètres

Tel que mentionné précédemment et observable sur la figure 2, le centre de masse est situé vers l'avant lorsque la flèche est déployée de 16 mètres. Ceci implique que dans l'éventualité où l'une des deux roues arrière s'engagerait au-dessus d'un trou, le système serait quand même en équilibre puisque le centre de masse se retrouverait au centre du triangle formé par les deux

roues avant et l'autre roue arrière, et que ces trois points suffisent à l'équilibre statique. Par contre, si le véhicule se déplaçait en marche arrière et qu'il freinait au moment où une roue arrière se trouvait au-dessus d'une cavité, le moment produit par la décélération du véhicule produirait probablement son basculement et un mouvement du pneu libre vers le fond du trou, dans une situation analogue à celle étudiée dans ce rapport.

Conclusion

Différents aspects liés au mouvement de la plate-forme d'une plate-forme élévatrice ont été abordés dans ce rapport d'expertise. La dynamique du système a été étudiée en considérant les circonstances de l'accident survenu le 22 octobre 2018, dans lequel un travailleur a été retrouvé au sol après avoir effectué une chute de 11 mètres à partir de la plate-forme dans laquelle il prenait place.

L'étude de la dynamique de la flèche et de la plate-forme a permis d'établir, à partir d'un modèle CAO et d'un modèle analytique, que la rotation de la plate-forme élévatrice lorsque sa roue avant gauche s'est engagée dans une cavité de 7.6 cm de profondeur a conféré à la plate-forme des déplacements et des vitesses importantes dans les trois directions, la vitesse résultante ayant pu être d'une intensité de 2.68 m/s et le déplacement global résultant de 0.67 m.

À cette vitesse, l'arrêt brusque a pu produire sur le travailleur, à cause du mouvement relatif de la plate-forme, des forces inertielles importantes le déstabilisant et pouvant le projeter.

Suite à ce freinage, l'élasticité de la flèche et l'énergie cinétique qu'elle contenait, ainsi que le faible facteur d'amortissement du système, ont résulté en des oscillations d'amplitude importante. Ces oscillations subies par la flèche et la plate-forme, dont la masse est importante par rapport à celle du travailleur et des outils, ont pu contenir suffisamment d'énergie pour que le travailleur et ses outils soient éjectés.

Par ailleurs, une analyse de l'effet trampoline a conduit au constat qu'en plus des oscillations occasionnées par l'arrêt soudain au fond de la cavité, il est possible et plausible de supposer que la plate-forme, qui se déplaçait sur un terrain non pavé et irrégulier, avait pu rencontrer d'autres cavités ou bosses avant d'atteindre la position de l'accident et qu'elle pouvait déjà subir un certain mouvement oscillant lors de l'accident, avant de s'engager dans la cavité de 7.6 cm ou se terminer son déplacement. Une éventuelle oscillation préalable a pu contribuer à augmenter le mouvement de la flèche et de la plate-forme produit par le passage dans la cavité de 7.6 cm.

Suite à cette analyse, appuyée sur des hypothèses plausibles et conservatrices, je suis d'avis que le travailleur a fort probablement été éjecté de la plate-forme.



Jean Ruel, ing. Ph.D., le 20 décembre 2019
No. OIQ : 106 900

Références

- [1] Document *Précisions pour l'expertise.doc* fourni par la CNESST.
- [2] Service and Maintenance Manual, Models 600S, 600SJ, 660SJ, JLG, January 30 2018, document *Service_3121202_01-30-2018_Global_English.PDF*.
- [3] Manuel d'utilisation et de sécurité, Élévateurs à flèche modèles 600S, 600SJ, 660SJ, JLG, 1^{er} mai 2012, document *Operation_3122533_05-01-12_Global_French.PDF*.
- [4] Passenger Stability Within Moving Railway Vehicles: Limits on Maximum Longitudinal Acceleration, J. P. Powell and R. Palacin, *Urban Rail Transit* (2015) 1(2):95–103, DOI 10.1007/s40864-015-0012-y.
- [5] *Theory of Vibration*. W. T. Thomson and M. D. Dahleh. 5th Ed., Prentice Hall, 1998.
- [6] *Structural Dynamics: Theory and Applications*. J. W. Tedesco, W. G. McDougal and C. A. Ross. Addison Wesley Longman Inc, 1999.
- [7] *Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures*. A. Filiatrault. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1996.
- [8] *Mechanical Vibrations*. S. G. Kelly. Schaum's outlines series. McGraw-Hill, 1993.

ANNEXE E

Références bibliographiques

1. ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION, *Plate-formes de travail élévatrices automotrices à bras articulé*, Mississauga, Ont., ACNOR, 2003, 30 p. (CAN/CSA B354.4-02).
2. ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION, *Plates-formes élévatrices mobiles de personnel – Formation des opérateurs (conducteurs) [ISO 18878 :2013, MOD]*, Toronto, Ont., ACNOR, 2017, 13. (CAN/CSA-B354.8 :17).
3. MANUEL D'UTILISATION ET DE SÉCURITÉ, *Élévateurs à flèche modèle 600S, 600SJ, 660SJ*, 9^e éd., Hagerstown, MD, USA, JLG Industries inc., 2012, 131 p.
4. MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, *Données climatiques – Sommaire de données climatiques*, [En ligne], 2018, [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/OQcarte.asp>], (Consulté 2019).
5. MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, *Normales climatiques du Québec 1981-2010*, [En ligne], 2018, [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/index.asp>], (Consulté 2019).
6. QUÉBEC, *Règlement sur la santé et la sécurité du travail*, RLRQ, chapitre S-2.1, r.13, à jour au 30 janvier 2019, Québec, Éditeur officiel du Québec, 2019, 125 p.
7. QUÉBEC, *Loi sur la santé et la sécurité du travail*, RLRQ, chapitre S-2.1., à jour au 20 juin 2018, Québec, Éditeur officiel du Québec, 2018, vi, 65, xii p.