

RAPPORT D'ENQUÊTE

**Accident ayant causé la mort d'un travailleur de l'entreprise
Ezeflow inc., située au 985, rue André-Liné, Granby,
le 14 janvier 2020**

Version dépersonnalisée

**Service de la prévention-inspection Montérégie-Est
Direction de la prévention-inspection Centre-Sud**

Inspecteurs :

Roxana Alina Bindea

Maxime Archambault, ergonomiste

Date du rapport : 10 septembre 2020

Rapport distribué à :

- Monsieur [A], [...], Ezeflow inc.
- Comité de santé et de sécurité
- Monsieur [B], [...]
- Docteur Gilles Sainton, coroner
- Docteur Alain Poirier, directeur de santé publique par intérim de l'Estrie

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	5
<u>3</u>	<u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	<u>7</u>
3.1	DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	7
3.2	DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	8
<u>4</u>	<u>ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u>	<u>10</u>
4.1	CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	10
4.2	CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	11
4.2.1	INFORMATIONS SUR LE TRAVAILLEUR ACCIDENTÉ	11
4.2.2	TRAVAUX DE SOUDAGE	11
4.2.3	GESTION DES ACTIVITES DE SOUDAGE	19
4.2.3.1	Historique des activités de soudage	19
4.2.3.2	Méthode de travail pour les travaux d'installation et de soudage de raccords	20
4.2.3.3	Supervision	20
4.2.3.4	Jour de l'accident	21
4.2.4	CONSTATATIONS SUR LE LIEU DE L'ACCIDENT	22
4.2.5	SIMULATION DE ROTATION DU POSITIONNEUR 61	25
4.2.6	EXPERTISE RÉALISÉE PAR M. JEAN RUEL, ING., PH. D.	27
4.2.6.1	Position du centre de masse	27
4.2.6.2	Angle limite de stabilité	28
4.2.6.3	Dynamique du soulèvement de la plaque	29
4.2.7	RÉGLEMENTATION ET NORMES APPLICABLES	31
4.3	ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES	35
4.3.1	LA PLATEFORME ÉLÉVATRICE, DÉSTABILISÉE PAR LE SOULÈVEMENT DE LA PLAQUE SUR LAQUELLE ELLE REPOSE EN PARTIE, SE RENVERSE.	35
4.3.2	LA GESTION DES TRAVAUX DE SOUDAGE EN HAUTEUR EST DÉFICIENTE EN CE QUI A TRAIT À L'IDENTIFICATION DES DANGERS ET À L'APPLICATION DES MESURES PRÉVENTIVES RELIÉES À L'UTILISATION D'UNE PLATEFORME DE TRAVAIL ÉLÉVATRICE.	36
<u>5</u>	<u>CONCLUSION</u>	<u>38</u>

5.1	CAUSES DE L'ACCIDENT	38
5.2	AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE	38
5.3	RECOMMANDATIONS (OU SUIVI DE L'ENQUÊTE)	38

ANNEXES

ANNEXE A :	Accidenté	40
ANNEXE B :	Liste des témoins et des autres personnes rencontrées	41
ANNEXE C :	Rapport d'expertise réalisé par M. Jean Ruel, ing., Ph. D.	42
ANNEXE D :	Références bibliographiques	58

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

Le 14 janvier, un travailleur s'affaire à effectuer des travaux de soudage en hauteur sur un raccord de grande dimension installé sur un positionneur. Pour ce faire, il prend place sur une plateforme de travail élévatrice automotrice avec système élévateur à ciseaux (ci-après nommée plateforme élévatrice). Il fait tourner le plateau du positionneur pour déplacer le raccord. Un support de montage fixé sur le positionneur entre alors en contact avec la plaque métallique installée sur une fosse juxtaposée au positionneur et provoque le soulèvement de la plaque. La plateforme élévatrice qui repose en partie sur la plaque se renverse et le travailleur est projeté hors de la plateforme, sur le plancher de béton.

Conséquences

Le travailleur décède des suites de ses blessures.

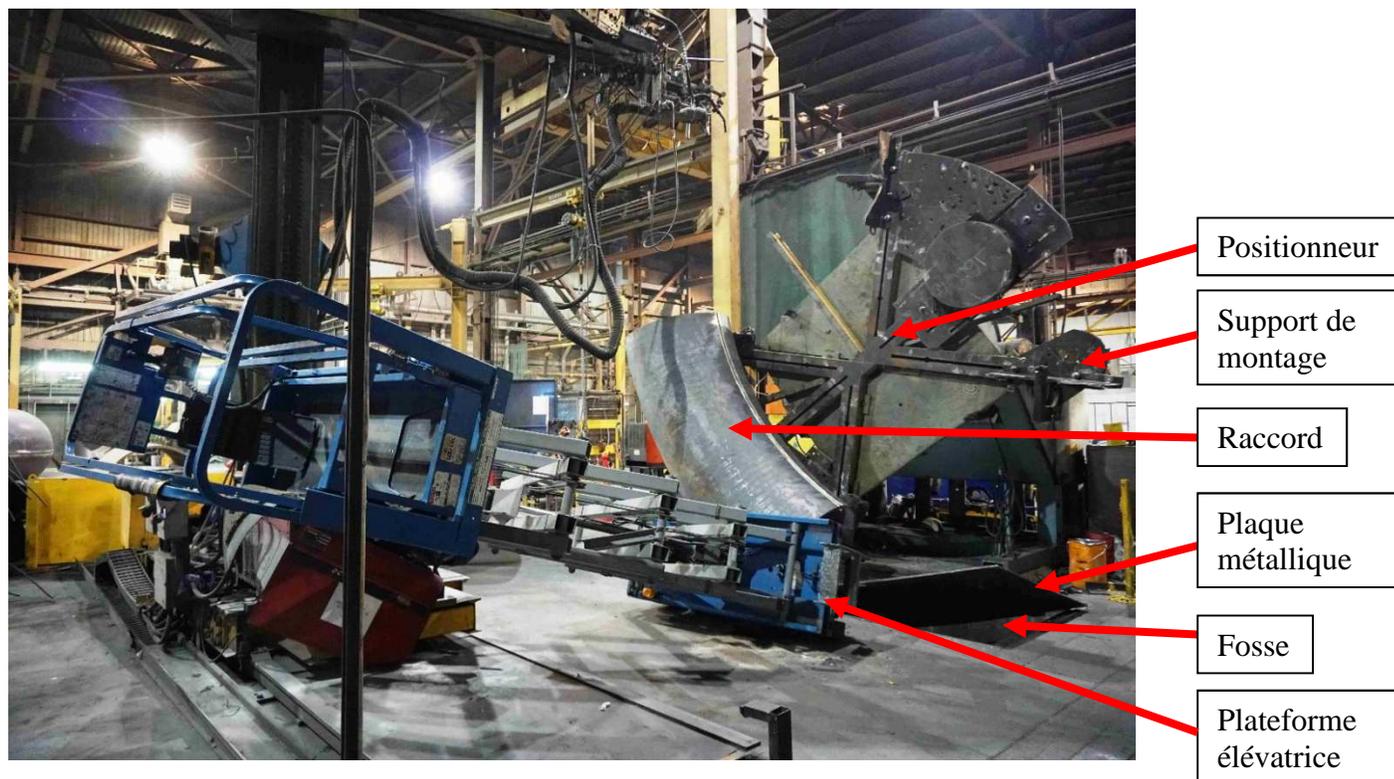


Photo 1 : Aperçu du lieu de l'accident

Abrégé des causes

L'enquête a permis de retenir les causes suivantes :

- La plateforme élévatrice, déstabilisée par le soulèvement de la plaque sur laquelle elle repose en partie, se renverse.
- La gestion des travaux de soudage en hauteur est déficiente en ce qui a trait à l'identification des dangers et à l'application des mesures préventives reliées à l'utilisation d'une plateforme de travail élévatrice.

Mesures correctives

À la suite de l'accident de travail, la CNESST a interdit les travaux d'installation et de soudage au poste du manipulateur 60 et du positionneur 61 ainsi qu'au poste du manipulateur 572 et du positionneur 149 (RAP1291251 daté du 15 janvier 2020).

L'employeur nous a soumis certains documents rédigés par des ingénieurs et a mis en place des mesures spécifiques aux postes du manipulateur 572, positionneur 149, manipulateur 60 et positionneur 61, notamment les certificats de capacité des plaques métalliques, l'analyse structurale de la capacité des positionneurs et des barrures, une procédure de travail sécuritaire pour les travaux d'installation et de soudage de raccords, le certificat de sécurité des positionneurs et manipulateurs, la formation des travailleurs concernés, un programme de maintenance préventive et des moyens de contrôle. Ainsi, le 28 janvier 2020, la CNESST autorise les travaux d'installation et de soudage des raccords sur rayon au poste du manipulateur 572 et du positionneur 149 (RAP1292606). Le 25 février 2020, la CNESST autorise les travaux d'installation et de soudage pour raccords linéaires seulement au manipulateur 60 (RAP1295899). Le 18 mars 2020, la CNESST autorise la reprise des travaux de soudage pour raccords sur rayon au positionneur 61 (RAP1298257). Le soudage hors rayon demeure interdit aux postes du manipulateur 572, positionneur 149, manipulateur 60 et positionneur 61.

Des correctifs empêchant l'accès aux pièces en mouvement des manipulateurs 572 et 60 et des positionneurs 149 et 61 ont été également exigés.

SECTION 2

2 ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1 Structure générale de l'établissement

L'entreprise se spécialise dans la conception et la fabrication de raccords de tuyauterie de grande dimension pour le transport de produits dans différentes industries, dont l'industrie chimique, pétrolière, gazière, de l'énergie nucléaire, de la récupération des sables bitumineux et du transport de l'eau salée ou sous haute pression.

Divers métaux et alliages sont utilisés pour la fabrication de raccords : acier au carbone, acier inoxydable, aluminium, chrome, molybdène, nickel, titane, zircon, duplex, super duplex, revêtements.

Le Groupe Ezeflow comporte trois usines de production, dont celle d'Ezeflow inc. située à Granby et deux autres localisées à New Castle aux États-Unis et à Broxburn, en Écosse.

Ezeflow inc. possède deux établissements à Granby. L'établissement où est survenu l'accident de travail regroupe les bureaux administratifs du siège social et les principales activités de production. Le deuxième établissement, localisé sur la même rue que le premier, effectue des activités d'entreposage, de réception, et occasionnellement, de radiographie et de soudure au sol.

L'établissement où est survenu l'accident emploie environ 142 travailleurs de production, dont 19 soudeurs, répartis sur 3 quarts de travail de 8 heures du lundi au vendredi et 2 quarts de travail, chacun d'une durée de 12 heures, les samedis et dimanches. Les travailleurs de production et les chefs d'équipe sont syndiqués et représentés par le syndicat des Travailleurs et travailleuses unis de l'alimentation et du commerce (TUAC), section locale 501.

La structure organisationnelle de la production de l'entreprise est la suivante :

[...]

Source : Ezeflow inc. modifié par la CNESST

Figure 1 : Structure hiérarchique de la production d'Ezeflow inc.

2.2 Organisation de la santé et de la sécurité du travail

2.2.1 Mécanismes de participation

Un comité de santé et de sécurité (CSS) paritaire se rencontre mensuellement. Celui-ci est composé de quatre représentants de l'employeur et quatre représentants des travailleurs. Le mandat donné consiste, entre autres, à :

- S'assurer que les directives de sécurité soient communiquées à tout le personnel;
- Afficher et distribuer les règlements et les rappels relatifs à la santé et la sécurité du travail;
- Réaliser des inspections des lieux de travail au moins une fois par mois;
- Voir à l'application des directives de sécurité et aviser la direction des règlements qui ne sont pas respectés;
- Participer à l'identification et l'évaluation des risques associés au travail;
- Procéder au suivi des actions en santé et sécurité du travail;
- Analyser les accidents de travail et effectuer le suivi des mesures correctives identifiées à la suite des enquêtes d'accident;
- Choisir les équipements de protection individuels.

Un compte-rendu de chaque rencontre est élaboré et affiché sur un tableau relatif à la santé et la sécurité au travail.

Plusieurs rencontres informelles se tiennent sur les lieux de travail où les travailleurs sont encouragés à informer l'employeur ou ses représentants des risques liés à la santé et la sécurité du travail et des solutions identifiées.

2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

L'entreprise fait partie du secteur d'activité économique (05) « Fabrication de produits en métal » du groupe prioritaire I. Ce secteur d'activité est couvert par l'association sectorielle paritaire MultiPrévention. [...].

Ezeflow inc. possède un programme de prévention qui contient entre autres une politique en santé et sécurité du travail, des dangers identifiés et des mesures de prévention, dont certaines applicables aux travaux de soudage.

Un programme d'accueil et de formation est en place. Une formation initiale sur les politiques et les règlements de l'entreprise est donnée aux nouveaux travailleurs. Par la suite, une visite de l'usine et du poste de travail est effectuée. Pour la fonction de soudeur, le travailleur doit détenir un diplôme d'études professionnelles (DEP) en soudure. Il est ensuite évalué conformément au Code du bâtiment, au Code B51 élaboré par l'Association canadienne de normalisation (CSA) ainsi qu'aux règles de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME) et qualifié par un technicien certifié. Après avoir été qualifié, le nouveau travailleur reçoit une formation d'entraînement à la tâche par accompagnement. Cette formation est donnée par un formateur interne. Chaque département de l'usine a un formateur interne désigné, recruté parmi les travailleurs expérimentés.

Chaque soudeur reçoit également des formations pour l'opération d'appareils de levage, tels que les plateformes de travail élévatoires automotrices, les ponts roulants et palans, les chariots élévateurs. Ces formations font l'objet d'une mise à jour tous les trois ans.

Un programme d'entretien préventif des manipulateurs et des positionneurs utilisés pour les travaux de soudage est appliqué par le département de la maintenance. Les dates des entretiens et les détails des travaux effectués sont consignés dans des fiches de maintenance préventive.

Les consignes générales sont mentionnées lors de l'accueil du travailleur. Les règles de sécurité spécifiques au soudage sont transmises lors de la formation d'entraînement à la tâche.

Les chefs d'équipe doivent assurer la supervision et le respect des règles de sécurité dans leur département. Une gradation dans les mesures disciplinaires est prévue lorsque des comportements non sécuritaires sont constatés.

Des inspections des lieux de travail et des audits en santé et sécurité sont réalisés.

L'employeur fournit notamment les équipements de protection individuels suivants : bottes de sécurité, lunettes de sécurité, casques de sécurité, visières de soudeur, appareils de protection respiratoire, gants, protecteurs auditifs et harnais de sécurité.

À la suite d'un accident de travail, une enquête d'accident est réalisée à l'aide d'un formulaire interne par le coordonnateur du département concerné en collaboration avec un représentant du

CSS, le chef d'équipe, l'accidenté et les témoins de l'accident. Le but principal des enquêtes est d'identifier les circonstances et les causes de l'accident et, au besoin, de mettre en place des mesures correctives afin qu'un tel événement ne se reproduise pas.

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

L'établissement où est survenu l'accident est situé au 985, rue André-Liné, à Granby.

Il regroupe notamment les activités suivantes : formage, coupe, soudage, calibration, radiographie, traitement thermique, machinage, vérification de la qualité, finition et expédition.

La superficie de l'usine est d'environ 13 500 m².



Source : Google maps

Photo 2 : Ezeflow inc. (vue aérienne)

L'établissement fabrique des raccords industriels ayant un diamètre de 200 à 2140 mm et une épaisseur de la paroi jusqu'à 100 mm, de toutes les formes et configurations.

Les travaux de soudage sont effectués au sol ou en hauteur. Le département de soudure compte des soudeurs de classe A et B. Les soudeurs de classe A maîtrisent tous les procédés de soudure avec une variété de métaux et alliages, incluant ceux exotiques comme le nickel, le titane, etc. Les soudeurs de classe B effectuent principalement le soudage de l'acier et de l'acier inoxydable. Le

lieu de travail est équipé de plusieurs manipulateurs et positionneurs permettant d'exécuter le soudage des pièces de grandes dimensions. L'accident a eu lieu au poste de travail du manipulateur 60 et du positionneur 61.

[...]

Source : Ezeflow inc. modifié par la CNESST

Figure 2 : Localisation du manipulateur 60 et du positionneur 61 au département de soudure (vue en plan)

3.2 Description du travail à effectuer

Le soir de l'accident, le travail à effectuer consiste à compléter le soudage d'un raccord en forme de coude. Le raccord est identifié à l'interne comme étant la pièce numéro 2 de l'item numéro 1 du bon de travail 14846.

Le travail avait commencé au cours du quart de jour avec l'installation du raccord sur le positionneur 61, suivi par le soudage MIG¹ au sol du petit côté (petit arc) du raccord (voir photo 4).

Afin de compléter le soudage du raccord, le grand côté (grand arc) du raccord doit être soudé avec le procédé MIG et, par la suite, une soudure à l'arc submergé doit être rajoutée sur les deux côtés du raccord. Le travail est réalisé à l'aide du manipulateur 60 et du positionneur 61, permettant ainsi le soudage dans un sens perpendiculaire au sol.

Une ouverture (fosse) est présente en avant du positionneur 61. En raison des grandes dimensions du raccord à souder, celui-ci doit être placé dans la fosse lors de sa rotation complète.

¹ Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode fusible.



Photo 3 : Fosse en avant du positionneur 61

Avant de procéder à la soudure du grand côté du raccord, ce dernier doit être levé hors de l'ouverture et positionné en hauteur. Pour les travaux de soudage en hauteur, une plateforme élévatrice est utilisée. Afin de permettre au soudeur d'être à proximité du raccord lors de l'exécution de son travail, la plateforme élévatrice prend place, en partie, sur la plaque métallique recouvrant l'ouverture dans le plancher.

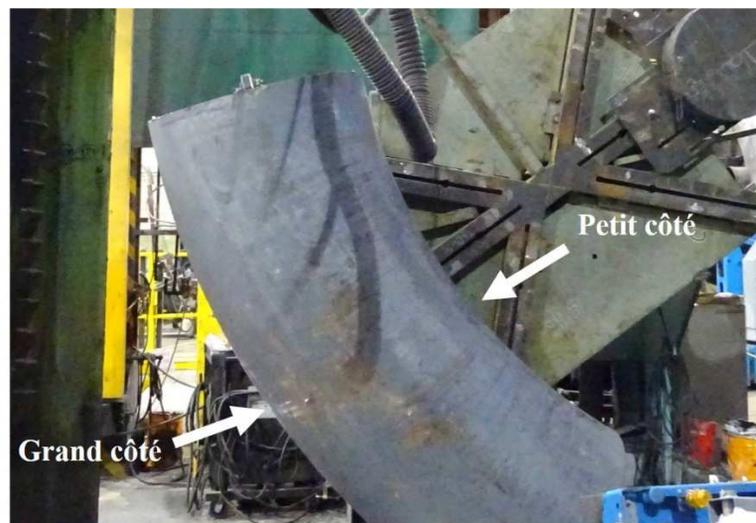


Photo 4 : Raccord à souder

SECTION 4

4 ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE

4.1 Chronologie de l'accident

Le 14 janvier 2020, vers 9 h, M. [C], [...], procède à l'installation d'un raccord en forme de coude nommé 48" 45° 3D sur le positionneur 61. Pour ce faire, il dessoude, nettoie et repositionne deux des quatre supports de montage soudés sur le positionneur 61. Ces supports avaient servi au maintien d'un autre type de raccords soudés la veille sur le positionneur 61. Lorsqu'il s'affaire à effectuer le repositionnement des deux autres supports de montage, M. [D], [...] au département de soudure, lui demande de cesser la préparation des supports de montage et de commencer la soudure du raccord. [C] installe le raccord sur le positionneur 61, en le fixant à l'aide des deux supports de montage repositionnés. Les supports de montage inutilisés restent sur le positionneur 61, dans la même position.

Vers 15 h 30, M. [E], [...], commence son travail et il est affecté à des tâches sur un autre positionneur.

Entre 16 h 15 et 17 h 20, [C] termine son travail en soudant, avec le procédé MIG, le petit côté du raccord à l'aide du manipulateur 60. Pour ce faire, en raison de la grande dimension du raccord, il déplace la plaque métallique recouvrant la fosse juxtaposée au positionneur 61, permettant ainsi d'insérer le raccord dans la fosse en activant la rotation du positionneur 61 et de souder à partir du sol.

Vers 17 h 20, avant de quitter le lieu de travail, [C] fait le ménage de son poste de travail, met en rotation le raccord et le laisse dans une position verticale à neuf heures d'un cadran, installe une rangée de cinq poteaux au fond de la fosse, réappose la plaque métallique sur l'ouverture, abaisse le bras du manipulateur 60 au niveau du sol et le positionne à gauche du positionneur 61.

À la suite du départ [de C], M. [F], [...] au département de soudure, affecte M. [E] à la poursuite des travaux sur le raccord maintenu par le positionneur 61.

Vers 18 h 20, [E] commence son travail au positionneur 61.

Vers 18 h 40, [F] va au positionneur 61 pour apposer ses initiales sur la feuille de production et constate que [E] se trouve dans la plateforme élévatrice et s'apprête à la déployer. Après une brève discussion, [F] part vers un autre poste de travail.

Afin de mettre le raccord dans une position horizontale à douze heures selon le cadran et procéder à la soudure du grand côté du raccord, le travailleur fait tourner le positionneur 61 dans le sens horaire. En effectuant cette opération, un des supports inutilisés du positionneur 61 entre en contact avec la plaque posée sur la fosse et entraîne son soulèvement. La plateforme élévatrice dont une ou deux roues reposent sur la plaque se renverse et le travailleur est projeté hors de la plateforme.

Ayant entendu le bruit occasionné par le renversement de la plateforme élévatrice, [F] et d'autres travailleurs accourent pour vérifier la provenance du bruit. [E] est retrouvé gisant au sol, près de la plateforme élévatrice sur laquelle il travaillait. À ce moment, le positionneur 61 tourne encore, en sens antihoraire.

Vers 18 h 55, un appel est effectué aux services d'urgence.

[E] est conduit en ambulance au Centre hospitalier universitaire de Sherbrooke. Son décès survient quelques heures plus tard des suites de ses blessures.

4.2 Constatations et informations recueillies

4.2.1 Informations sur le travailleur accidenté

M. [E] est à l'emploi d'Ezeflow inc. depuis le [...] à titre de [...]. Au moment de l'accident, le travailleur occupe le poste de soudeur de classe B au département de soudure.

Il détient notamment un diplôme d'études professionnelles en soudage et une formation d'opérateur de plateforme de travail élévatrice automotrice. Cette dernière a été donnée par la [...] le [...].

À la suite de son embauche, le travailleur a suivi la formation d'entraînement à la tâche sous la forme d'accompagnement et il a réussi les épreuves de qualification des soudeurs. Les tâches à effectuer, les risques inhérents au travail et le fonctionnement des équipements et instruments à opérer lui ont entre autres été présentés.

Ses principales tâches consistent, entre autres à manipuler, préparer et installer diverses pièces ainsi qu'à réaliser différents assemblages soudés. Il effectue son travail à l'aide de plusieurs manipulateurs et positionneurs, dont le manipulateur 60 et le positionneur 61. Il a donc plusieurs centaines d'heures d'expérience sur ces machines. Depuis juin 2019, il a fréquemment utilisé les plateformes élévatrices.

Selon les besoins de production, on l'affecte occasionnellement à des tâches au département des presses.

4.2.2 Travaux de soudage

Le processus de fabrication de raccords comprend plusieurs étapes. Ainsi, des plaques d'épaisseurs variables en métaux et alliages variés sont chauffées et par la suite moulées ou forgées à l'aide de matrices. Les pièces sont ensuite soudées et radiographiées afin de s'assurer de l'absence d'anomalies. Les travailleurs effectuent l'usinage, la calibration et le traitement thermique des pièces. Enfin, avant d'être peintes et expédiées, les pièces font l'objet de travaux de finition.

Les raccords fabriqués par Ezeflow inc. peuvent avoir de nombreuses formes, configurations et dimensions, soit en forme de coudes, de raccords en T, de réducteurs, de raccords latéraux, de raccords en croix, de raccords spécialisés et de bouchons.

Le coude change la direction du tuyau dans le système de tuyauterie. Selon l'angle, les coudes fabriqués peuvent être notamment :

- 45° à long rayon, à court rayon, 3D;
- 90° à long rayon, à court rayon, 3D, 5D;
- 180° de renvoi à long rayon ou à court rayon.

À la demande du client, des configurations et des dimensions personnalisées, à d'autres angles, peuvent être produites.

La différence entre les divers raccords en forme de coude est entre autres déterminée par la distance sur laquelle ils changent de direction, soit leur longueur et courbure. Le rayon de courbure (R) d'un coude à long rayon (LR) est égal à 1,5 fois le diamètre (D) du tuyau, tandis qu'un coude à court rayon (SR) a un rayon égal au diamètre du tuyau. Ainsi, la courbure du coude à court rayon est plus accentuée alors que la courbure du coude 3D est plus longue que celle du coude à long rayon.

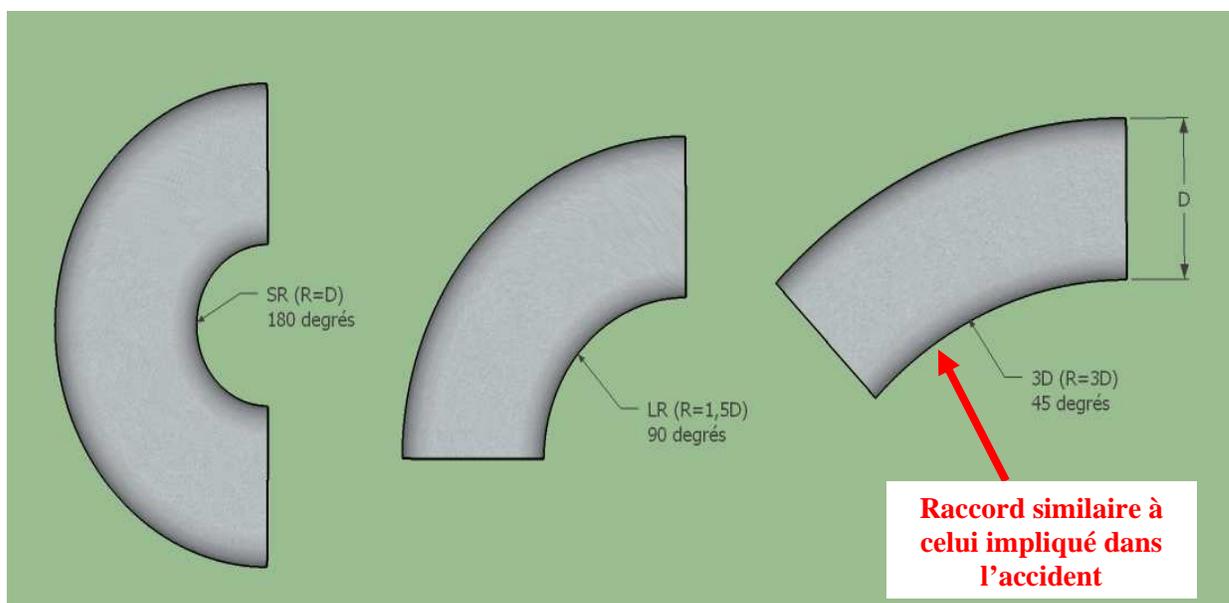


Figure 3 : Divers raccords en forme de coude

Les raccords linéaires sont installés sur un support au sol ou directement sur le sol en utilisant des cales. Afin de maintenir et positionner les raccords non linéaires à souder, ces derniers sont fixés au plateau tournant d'un positionneur, permettant ainsi le soudage à l'aide d'un manipulateur dans un sens perpendiculaire au sol.

La courbe et les dimensions du raccord déterminent s'il est « sur rayon » ou « hors rayon » une fois installé sur le positionneur pour le soudage. Ainsi, si le rayon d'un raccord est en dehors du rayon du positionneur, on considère que le raccord est « hors rayon ». Un raccord « sur rayon » crée un cercle lors de la rotation du plateau du positionneur, alors qu'un raccord qui forme une ellipse lors de sa rotation est « hors rayon ». Pour que certains raccords soient dans le rayon durant les travaux de soudage, ils doivent être installés à une distance plus grande du centre du plateau du positionneur. Le soudage de raccords hors rayon requiert que le soudeur varie sa hauteur et sa position horizontale pendant l'exécution du travail afin de suivre le mouvement des raccords. Le

soudeur doit également déplacer la buse de soudure du manipulateur au fur et à mesure de la rotation du raccord. Les autres types de soudage ne nécessitent pas ce mouvement.

[...]

Source : Ezeflow inc.

Figure 4 : Positionneur avec des pièces sur rayon et hors rayon (vue en élévation)

Avant juin 2019, les travailleurs effectuaient les travaux de soudage en hauteur en prenant place sur de sièges fixés sur les bras horizontaux des manipulateurs. En juin 2019, à la suite d'un accident impliquant la chute au sol du bras d'un manipulateur à souder, l'employeur décide de retirer les sièges des manipulateurs et d'utiliser des plateformes élévatrices avec système élévateur à ciseaux ou à bras articulé. À ce moment, des poteaux en métal ont été installés sous la plaque recouvrant l'ouverture en avant du positionneur 61 afin que la plaque puisse supporter le poids des plateformes. Le nombre et la disposition des poteaux sous la plaque ont été déterminés selon les directives de l'ingénieur interne de l'usine.

L'usage de plateformes élévatrices pour les travaux de soudage en hauteur est une mesure temporaire, car l'employeur prévoit l'installation et la mise à l'essai d'un nouvel équipement muni d'un système de caméra permettant à l'opérateur de souder à partir du sol.

Le poste de travail où est survenu l'accident comprend, notamment le manipulateur 60 et le positionneur 61. Ces équipements permettent l'exécution des opérations d'assemblage et de soudage nécessitant une adaptation de la hauteur de travail ou un retournement de pièces de grandes tailles.

Pièce à souder

La pièce à souder lors de l'accident est un raccord de tuyauterie en forme de coude composé de deux coquilles préalablement fixées par l'entremise d'un procédé de soudage par point. Étant

donné son diamètre, sa courbure et sa longueur, ce type de raccord est nommé 48" 45° 3D (voir figures 3 et 4). Le poids du raccord est de 2530 kg (5577 lb).

En raison de leurs dimensions, les raccords de type 48" 45° 3D sont habituellement installés un à la fois sur le positionneur.

Ce type de raccord requiert du soudage « hors rayon ». Le raccord est fixé sur le positionneur 61, celui-ci étant le seul positionneur de l'usine sur lequel le soudage hors rayon des raccords d'une telle dimension peut être réalisé.

Manipulateur de soudage 60

Il s'agit d'un manipulateur de soudage de marque IRCO, fabriqué en 1991. L'équipement a été acheté usagé par l'entreprise en 1998. Cette machine de soudage est composée, notamment d'une colonne verticale et d'un bras horizontal. La torche de soudage, les fils, les bouteilles de gaz comprimé, les autres éléments de soudure et le panneau de commande sont fixés sur le bras horizontal de l'équipement.

Le traîneau du manipulateur est placé sur des rails, ce qui lui permet d'avancer et de reculer. Le bras horizontal du manipulateur effectue des déplacements gauche-droite et haut-bas. Le dispositif de commande du déplacement vertical et horizontal du bras nécessite une action maintenue.

L'équipement ne pivote pas, l'orientation du bras horizontal étant réglée manuellement avant de commencer le soudage, à partir du sol, en desserrant les boulons à la base du traineau du manipulateur.

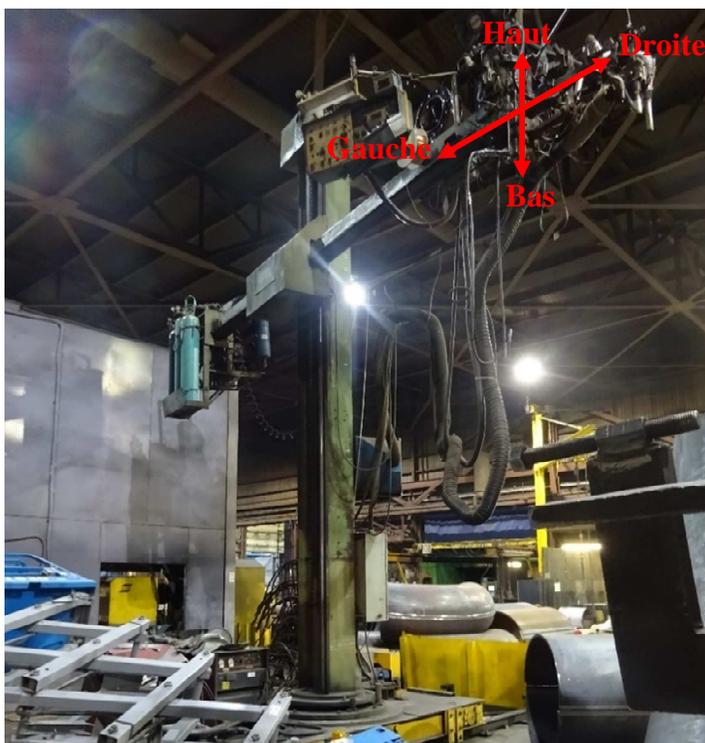


Photo 5 : Manipulateur de soudage 60

Positionneur 61

Le positionneur de marque Aronson, modèle HD500 permet de placer et maintenir une pièce dans une certaine position. L'année de fabrication est inconnue. L'équipement a été acheté usagé par l'entreprise en 1998.

Les caractéristiques du positionneur sont les suivantes :

- Selon le manufacturier, le couple maximal est de 67 791 Nm (600 000 lb-po) en rotation et de 117 165 Nm (1 037 000 lb-po) en inclinaison.
- Les dispositifs de commande du positionneur se trouvent au panneau de commande installé sur le bras du manipulateur 60 (voir photo 7).
- Le sélecteur pour activer la rotation du plateau du positionneur comprend trois positions, soit neutre, rotation en sens horaire et rotation en sens antihoraire. Ce sélecteur de commande ne nécessite pas d'action maintenue. Une fois enclenché dans un sens de rotation, il y demeure jusqu'au moment où une nouvelle intervention de l'opérateur est effectuée.
- La vitesse de rotation du plateau est ajustable par un potentiomètre. La vitesse maximale de rotation est de 0,25 tours par minute (rpm), alors que la vitesse de soudage utilisée pour les raccords de type 48" 45° 3D est de 0,02 tours par minute (rpm). Pour positionner les raccords installés sur le positionneur, la vitesse maximale ou une vitesse plus grande que celle de soudage est utilisée.

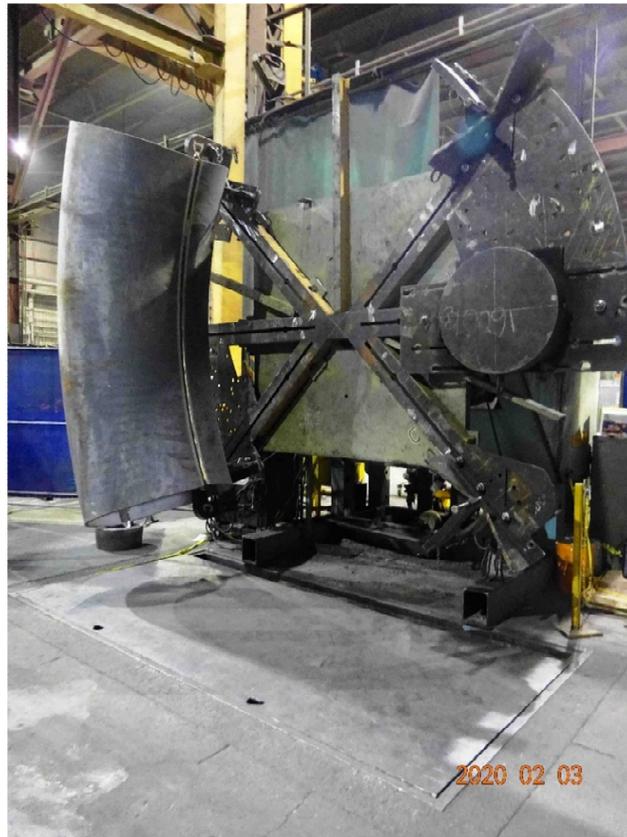


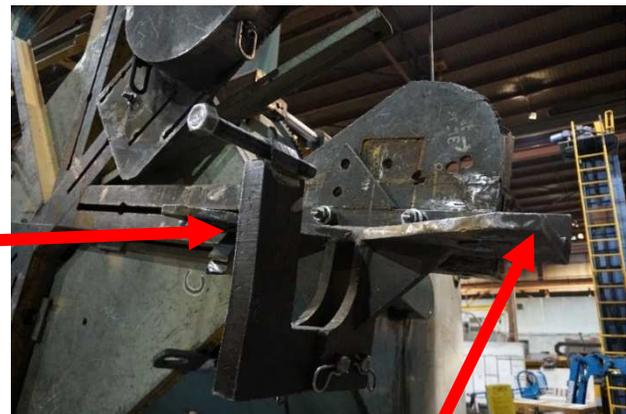
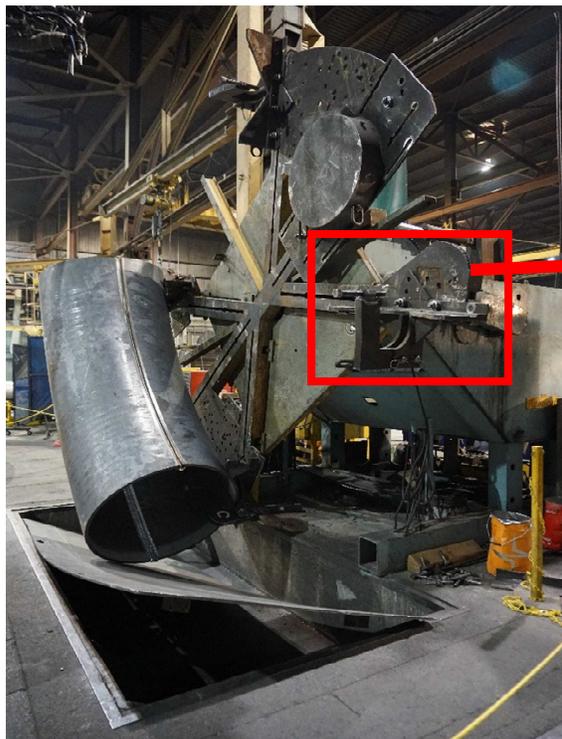
Photo 6 : Positionneur 61



Photo 7 : Panneau de commande du positionneur 61 et du manipulateur de soudage 60

Le plateau du positionneur est inclinable et équipé de perçages pour le maintien du raccord à positionner. Un, deux ou quatre raccords peuvent être installés sur le positionneur, en fonction de la grandeur de la pièce.

Le raccord à souder est fixé sur le positionneur à l'aide de supports de montage qui sont eux-mêmes fixés au plateau de la machine (voir photos 8 et 10).



Point de contact avec la plaque métallique au moment de l'accident

Photos 8 et 9 : Support de montage



Photo 10 : Raccord fixé

Lorsqu'un seul raccord est placé sur le positionneur, un contrepoids est également installé afin de balancer le poids sur l'équipement et permettre d'éviter la secousse soudaine de la machine lorsque le raccord commence sa descente et une accélération spontanée de sa vitesse survient (voir photo 11).



Photo 11 : Contrepoids

Le soudage du grand côté des raccords s'effectue en tournant le plateau du positionneur en sens antihoraire, alors que le petit côté est soudé en sens horaire.

Une plaque métallique est utilisée pour recouvrir l'ouverture dans le plancher (fosse) qui est présente en avant du positionneur. La longueur de l'ouverture est d'environ 3,65 m (144 po), alors que sa largeur est d'environ 1,87 m (74 po). La profondeur de la fosse est d'environ 0,7 m (27,5 po). Un rebord métallique d'environ 5 cm (2 po) est en place sur les côtés de la fosse. La plaque est amovible et elle a approximativement les dimensions suivantes : longueur de 3,73 m (147 po), largeur de 1,68 m (66 po) et épaisseur de 1,27 cm (0,5 po). Donc, la plaque ne recouvre pas la totalité de la fosse, car environ 19 cm (8 po) sur la largeur de la fosse sont à découvert.



Photo 12 : Plaque métallique sur l'ouverture en avant du positionneur 61

Des poteaux en métal sont placés dans la fosse afin de supporter la plaque lorsqu'une plateforme élévatrice y prend place.

Plateforme élévatrice avec système élévateur à ciseaux

La plateforme élévatrice impliquée dans l'accident est de marque Genie, modèle GS-1930 et son numéro de série est [...]. L'équipement est loué de l'entreprise Lou-Tec Industriel.

La masse de la plateforme élévatrice est de 1246 kg (2749 lb) et sa capacité de 227 kg (500 lb). La largeur de l'équipement (extérieur des pneus) est de 76 cm (30 po), alors que l'empattement est de 132 cm (52 po).

Le manuel de l'opérateur de la plateforme élévatrice donne certains avertissements de sécurité en lien avec son utilisation. Concernant le lieu de travail, un des avertissements indique notamment :

« Tenir compte des situations à risque suivantes et les éviter :

- dévers ou trous;
- bosses, obstacles sur le sol ou débris;
- surfaces pentues;
- surfaces instables ou glissantes;
- obstacles en hauteur et conducteurs à haute tension;
- endroits dangereux;
- sol insuffisamment ferme pour résister à toutes les forces de charge imposées par la machine;
- force du vent et conditions météorologiques;
- présence de personnel non autorisé;
- autres situations à risque potentielles. »

La plateforme élévatrice est apportée au poste de travail du positionneur 61 par [E]. Au moment de l'accident, [E] porte un harnais de sécurité relié par une liaison antichute au système d'ancrage de la plateforme élévatrice. La liaison antichute est composée d'un absorbeur d'énergie et d'un cordon d'assujettissement ayant une longueur de 1,8 m (6 pi).

4.2.3 Gestion des activités de soudage

4.2.3.1 Historique des activités de soudage

En juin 2019, les sièges des manipulateurs ont été retirés et il a été décidé d'utiliser des plateformes élévatoires (à ciseaux et à bras articulé) pour les travaux de soudage en hauteur. Les soudeurs, les chefs d'équipe, les coordonnateurs, [G], [H] et [I] furent impliqués dans le choix de ces équipements et dans les modifications à apporter méthodes de travail.

À la suite de l'implantation de ces nouveaux appareils servant pour les travaux de soudage aux postes de travail comprenant les manipulateurs et les positionneurs, aucune analyse de risques n'a été effectuée pour s'assurer de leur utilisation sécuritaire et sans interférence avec les autres équipements de soudage.

Les modifications à apporter aux manipulateurs et positionneurs sont autorisées par les coordonnateurs de production, les chefs d'équipe du département de soudure et [I].

4.2.3.2 Méthode de travail pour les travaux d'installation et de soudage de raccords

Au département de soudage, un tableau indique quelle machine à utiliser en fonction du type de pièces à souder. En outre, un cartable compile des indications et des photos relatives à l'emplacement des supports de montage sur le plateau du positionneur. Cependant, aucune consigne relative aux supports de montage inutilisés n'y est indiquée.

Il n'y a pas de procédure formelle relative à l'installation des raccords et au soudage, notamment en ce qui a trait aux équipements (plateforme élévatrice, manipulateur et positionneur) utilisés en interaction lors de ces opérations. Des consignes relatives à ces opérations sont transmises de façon verbale aux travailleurs lors de la formation d'entraînement à la tâche. Cette formation traite entre autres d'une directive selon laquelle, à la suite de l'installation du raccord, les soudeurs doivent effectuer une rotation complète du raccord avant de monter dans la plateforme élévatrice et commencer la soudure. Cependant, cette directive n'est pas connue ni appliquée par tous les soudeurs.

Des consignes verbales sont également données par [...] au début du quart de travail ainsi qu'au besoin lors des situations plus complexes nécessitant des changements dans l'utilisation des équipements ou de nouvelles méthodes de production.

Au département de soudure, il est habituel que des supports de montage qui ne supportent aucune charge demeurent sur le positionneur afin de servir de contrepoids supplémentaire.

Chaque pièce à produire est accompagnée d'une fiche de suivi (nommée « fiche suiveuse » par l'employeur) et d'une fiche technique identifiant chaque étape de production. Concernant l'étape de soudure, les paramètres de soudage selon le procédé et le matériel de soudage y sont notamment indiqués. Chaque soudeur doit effectuer l'inspection visuelle de la pièce pré-soudure et post-soudure, indiquer sur la fiche son nom, le matériel de soudage choisi, l'heure de début et de fin des travaux et l'initialiser. [...] doit vérifier si le choix du matériel de soudage est adéquat, faire le suivi des exigences de soudure et l'inspection finale de la pièce en contresignant la fiche.

Le choix du type de plateforme élévatrice, soit à ciseaux ou à bras articulé, est laissé à la discrétion du soudeur. Toutefois, lors du soudage de raccords hors rayon, la plateforme élévatrice à ciseaux est utilisée pour la possibilité de reculer sans contrecoups ou débalancement ainsi que pour la facilité de l'opération des commandes qui sont situées en avant de l'opérateur.

4.2.3.3 Supervision

En ce qui a trait au contrôle en santé et sécurité du travail à la soudure, les chefs d'équipe vérifient notamment le port des équipements de protection individuels par les travailleurs, la réalisation de l'inspection visuelle des appareils de levage avant leur utilisation et le respect des règlements de l'entreprise. Ce contrôle est effectué par de l'observation visuelle.

Aucun moyen de contrôle formel n'est déterminé afin de s'assurer que les soudeurs effectuent une rotation complète du raccord avant de monter dans la plateforme élévatrice et commencer la soudure.

Lors d'un changement de quart, des échanges verbaux ont lieu entre les chefs d'équipe au besoin. Il y a également un livre dans lequel ils peuvent se laisser des informations sur les pièces à réaliser ou encore l'état des machines.

Les utilisateurs des plateformes élévatrices utilisées pour les travaux de soudage en hauteur doivent porter un harnais de sécurité relié par une liaison antichute au système d'ancrage de la plateforme élévatrice.

4.2.3.4 Jour de l'accident

Le 14 janvier 2020, c'était la première fois qu'un raccord « hors rayon » d'un diamètre de 48 pouces était soudé en utilisant une plateforme élévatrice. D'autres raccords « hors rayon », mais de plus petites dimensions, avaient déjà été soudés en hauteur à l'aide d'une plateforme élévatrice.

Lors de l'installation du raccord sur le positionneur 61, [D] discute avec [C], et par la suite avec [I], de la possibilité de couper ou de remplacer la plaque métallique recouvrant la fosse afin de permettre la rotation complète du raccord. Ils marquent la plaque d'une ligne où la coupe devait être réalisée. [J] et [I] approuvent l'achat d'une nouvelle plaque de plus petite dimension, mais plus épaisse. Puisque cette plaque ne serait disponible que dans quelques jours, ceux-ci ont indiqué au [D] de couper la plaque existante au positionneur 61.

Lors du changement de quart de travail, [D] et [F] échangent sur différentes méthodes de travail possibles :

- effectuer le travail sans plaque (avec la plateforme élévatrice placée sur le plancher de béton);
- advenant l'écart trop grand entre le soudeur et le raccord à souder, couper la plaque, y ajouter une cornière à l'extrémité pour la renforcer et positionner la plateforme élévatrice sur la plaque;
- laisser la plaque telle qu'elle pour que la plateforme élévatrice s'y place pendant le soudage du « grand côté » du raccord et par la suite, retirer la plaque pour que le raccord puisse entrer dans la fosse lors du soudage à l'arc submergé de son « petit côté ».

Finalement, pour s'assurer que le soudeur puisse se positionner à proximité du raccord à souder et que la plaque puisse supporter la plateforme élévatrice, il a été décidé de ne pas couper la plaque. La position des supports de montage n'a pas été considérée dans l'évaluation de la méthode de travail.

Exceptionnellement, il est déjà arrivé qu'un support de montage entre en contact avec la plaque qui couvre la fosse. Cela s'est produit avant que l'employeur utilise des plateformes élévatrices à des fins des travaux de soudage.

Les supports de montage impliqués dans l'accident avaient été utilisés lors des travaux précédents effectués sur le positionneur 61, notamment au maintien de raccords LR² de grand diamètre et poids important. Ainsi, les supports de montage avaient été soudés sur le positionneur afin de rassurer les soudeurs de la solidité de l'installation. Le 14 janvier 2020, [C] a effectué le repositionnement des deux premiers supports et, au moment où il s'affaire à réaliser

² Long rayon

le repositionnement des deux autres supports, [D] lui dit de les laisser en place, de commencer la soudure du « petit côté » du raccord et de remettre la plaque sur la fosse à la fin de son travail.

La fiche de suivi du raccord impliqué dans l'accident a été remplie par [C] et par [E] accidenté et elle comprend les initiales du [F].

4.2.4 Constatations sur le lieu de l'accident

La plateforme élévatrice est renversée sur son côté le plus long, une soudeuse placée sur le plancher ayant arrêté sa chute. La plateforme élévatrice est déployée à environ 3,7 m (12 pi) (distance entre le sol et le plancher de la plateforme).

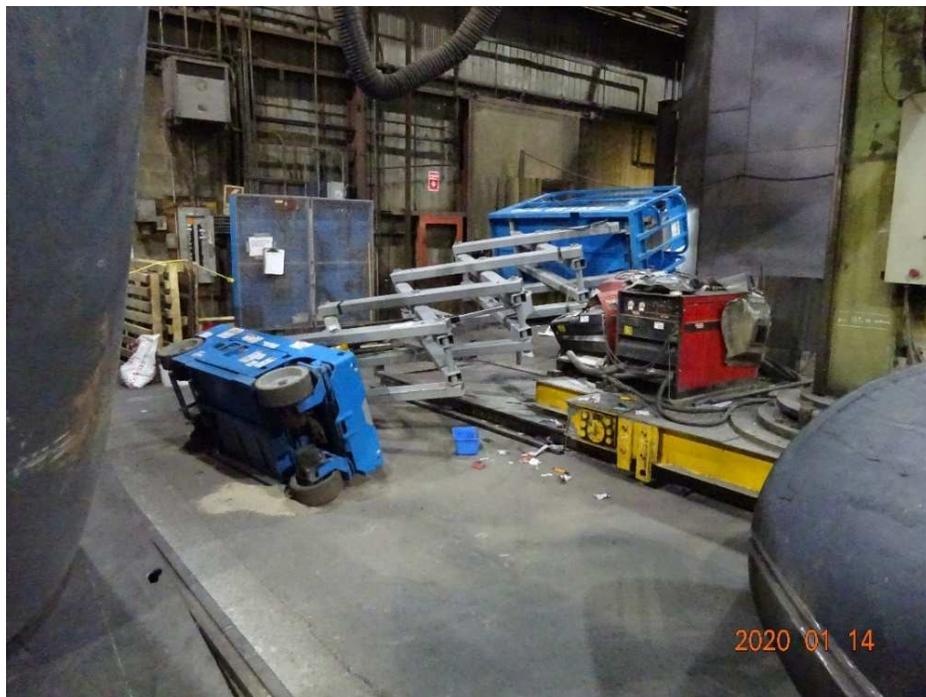


Photo 13 : Plateforme de travail élévatrice automotrice renversée

La base du raccord installé sur le positionneur 61 est appuyée sur la plaque recouvrant la fosse. Une extrémité de la plaque se trouve à l'intérieur de la fosse alors que l'autre extrémité est surélevée.

Quatre supports de montage sont fixés sur le positionneur, soit deux qui maintiennent le raccord et deux autres aux opposés qui sont non utilisés. Les supports de montage inutilisés sont soudés sur le positionneur.

Un contrepoids de 726 kg (1 600 lb) est également installé sur le plateau du positionneur.

Le petit côté du raccord est soudé avec le procédé MIG alors que la soudure du grand côté n'est pas commencée.

Les premiers travailleurs arrivés sur le lieu de l'accident ont retrouvé [E] au sol, près de la plateforme élévatrice sur laquelle il prenait place. Son harnais de sécurité était attaché au point d'ancrage de la plateforme. À ce moment, le positionneur tournait encore, en sens antihoraire. La plaque recouvrait sur la fosse et le raccord fixé sur le positionneur est entré en contact avec celle-ci au moment où ces travailleurs sont arrivés sur le lieu de l'accident. La rotation du plateau du positionneur a été arrêtée par un des travailleurs en mettant en position « hors service » le levier du sectionneur du circuit électrique qui alimentait l'équipement.

Une rangée de cinq poteaux en métal avait été déposée dans la fosse, approximativement au centre dans le sens de sa largeur. Lors de l'accident, ces poteaux sont tombés au fond de la fosse. Les poteaux ont été installés par [C] et leur disposition a été choisie en vue de la coupe de la plaque.



Photos 14 et 15 : Les poteaux placés dans la fosse (ces poteaux étaient debout avant l'accident)

La distance entre le sol et la base du panneau de commande du manipulateur 60 et du positionneur 61 est d'environ 4,9 m (193 po), alors que la distance entre le sol et le point le plus haut des commandes est d'environ 5,3 m (209 po).

Le sélecteur de commande de la rotation du plateau du positionneur 61 est en position « rotation antihoraire » (voir photo 16).

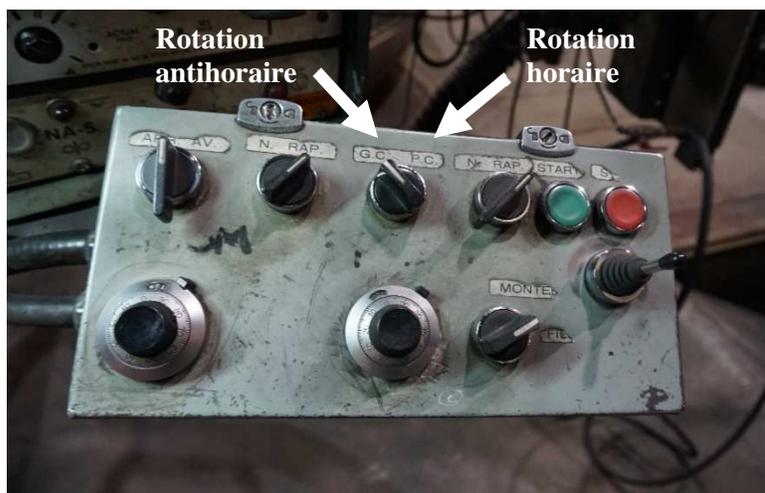


Photo 16 : Position du sélecteur de commande de rotation

Des traces de frottement créées par des supports de montage sont visibles sur la plaque métallique. À l'extrémité opposée au positionneur 61, il y a une trace de pneu dans la poussière présente sur la plaque au moment de l'accident. Cette trace concorde avec les caractéristiques des pneus installés sur la plateforme élévatrice.

Entre les roues qui touchent le sol et la plaque recouvrant la fosse au moment de l'accident, il y a une distance de 66 respectivement 81 cm (26 respectivement 32 po), alors que la distance entre les extrémités des pneus est de 76 cm (30 po). Ces mesures nous permettent d'établir qu'au moins une des roues de la plateforme élévatrice, soit celle arrière droite (roue encerclée sur l'image ci-dessous) était positionnée sur la plaque les moments précédant l'accident.

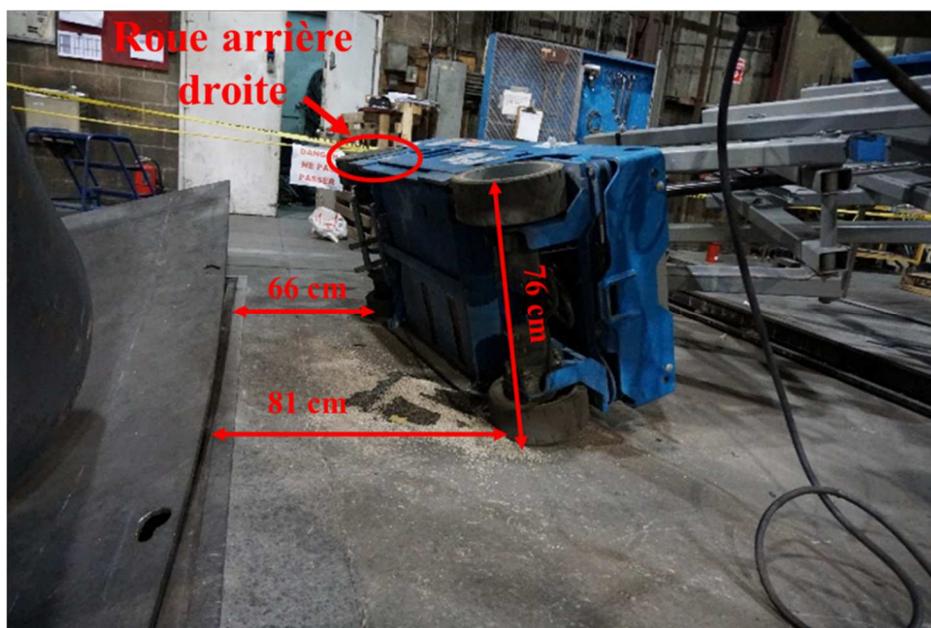


Photo 17 : Positionnement de la plateforme élévatrice

La distance entre le centre du plateau tournant du positionneur 61 et l'extrémité d'un des supports de montage inutilisés laissés sur le positionneur 61 est de 229 cm (90 po). La hauteur entre le centre du plateau du positionneur 61 et la plaque de la fosse est de 220 cm (86,5 po). Ces dimensions font en sorte que lors de la rotation du plateau du positionneur 61, le support de montage inutilisé entre en contact avec la plaque recouvrant la fosse (voir photo 18).

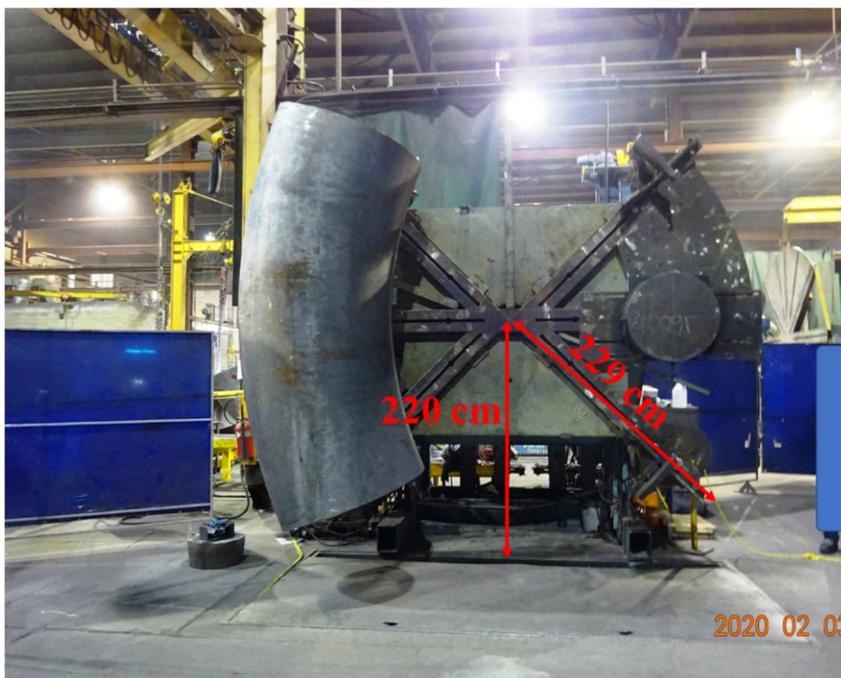


Photo 18 : Vue de face du positionneur 61

4.2.5 Simulation de rotation du positionneur 61

Une simulation a été réalisée quelques jours après l'accident dans des circonstances similaires. Le raccord est positionné tel que laissé par [C], soit dans une position verticale à neuf heures d'un cadran. Les cinq poteaux sont placés debout dans la fosse, dans la même disposition qu'au moment de l'accident, et la plaque est installée sur l'ouverture. Un poids de 312 kg (687 lb) – équivalent au quart du poids de la plateforme élévatrice – est déposé sur la plaque, à l'endroit où se trouvait approximativement la roue arrière droite (roue encerclée sur la photo 17) de la plateforme élévatrice.

Pour commencer la soudure du grand côté d'un raccord, ce dernier doit être placé dans une position horizontale à douze heures d'un cadran. Pour amener le raccord dans cette position, les soudeurs font tourner le plateau du positionneur 61 dans un sens horaire. Ainsi, la rotation en sens horaire du positionneur 61 est activée. La vitesse de rotation à laquelle le positionneur 61 est opéré lors de la simulation est celle lors de l'accident.

Lors de cette opération, en effectuant sa trajectoire circulaire, un des supports de montage inutilisés du positionneur 61 entre en contact avec la plaque et la soulève. Les photos 19, 20 et 21 montrent des images extraites de la simulation à différents instants où le support de montage est en contact avec la plaque et la soulève.

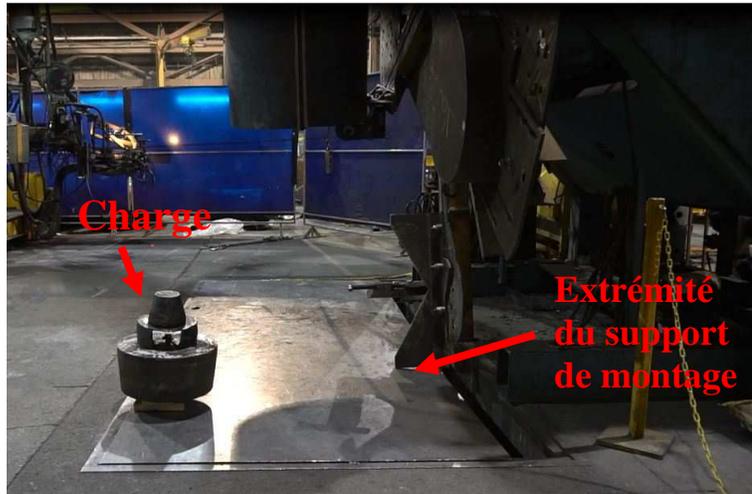


Photo 19 : Position initiale du support de montage lors du contact avec la plaque



Photo 20 : Position intermédiaire du support de montage lors du contact avec la plaque

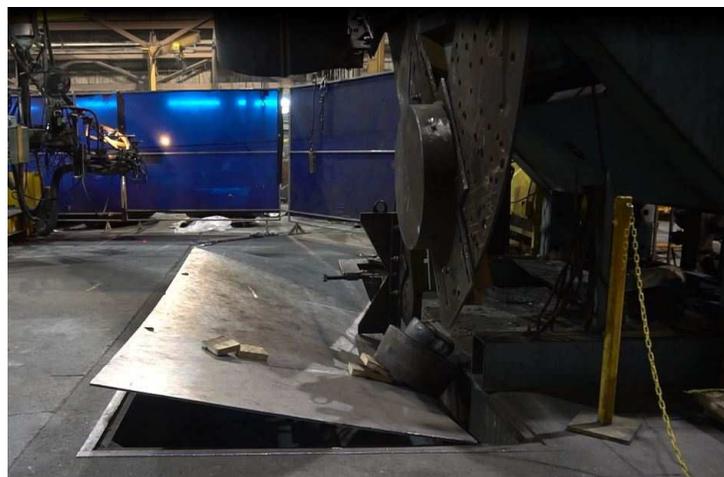


Photo 21 : Position du support de montage lorsqu'il est près de son point le plus bas

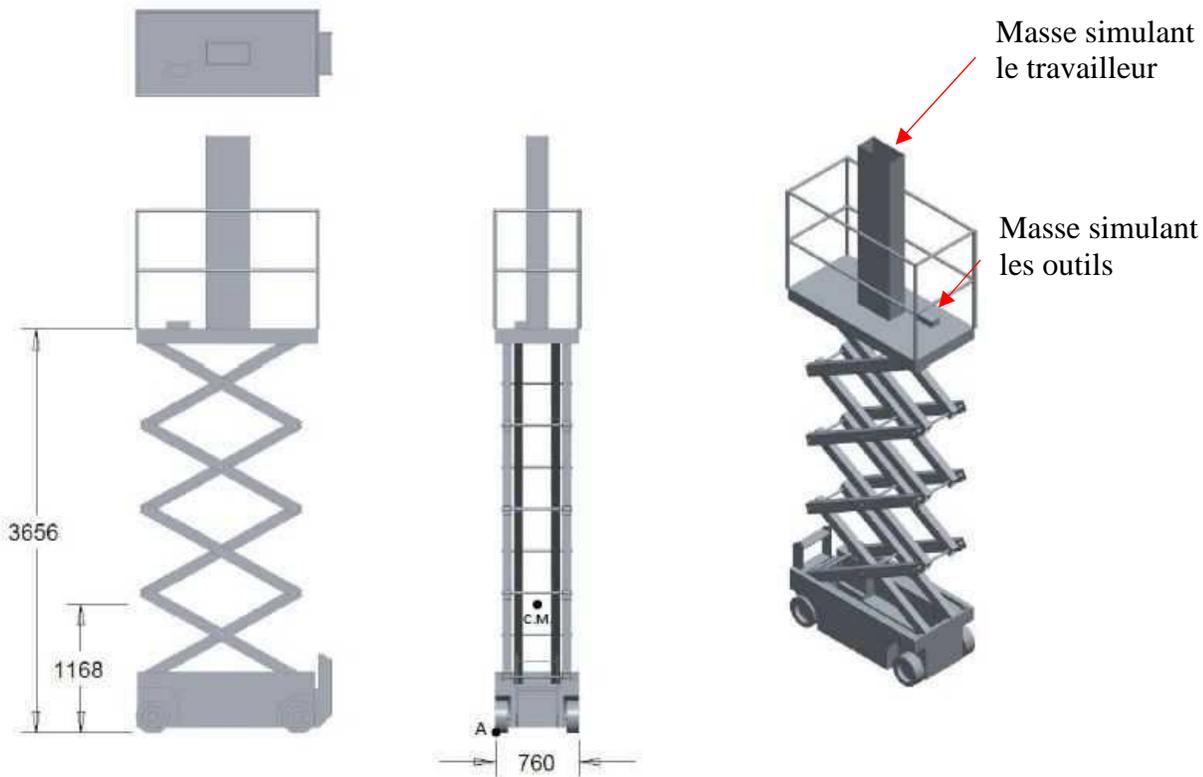
4.2.6 Expertise réalisée par M. Jean Ruel, ing., Ph. D.

La CNESST a mandaté M. Jean Ruel, ing., Ph. D., afin de faire une analyse technique des éléments ayant mené au renversement de la plateforme élévatrice. La stabilité de la plateforme a été étudiée à l'aide d'un modèle CAO³. Le rapport d'expertise est présenté à l'annexe C.

Les éléments ci-dessous sont notamment retenus du rapport d'expertise.

4.2.6.1 Position du centre de masse

Lorsque la plateforme élévatrice est déployée à 3,656 m (12 pi) du sol, le centre de masse (C.M.) se trouve à 1,168 m du sol et à 4,6 cm de la position médiane entre les roues avant et les roues arrière (voir figure 5).



Source : Rapport d'expertise

Figure 5 : Modèle CAO de la plateforme élévatrice GS-1930, dimensions en mm.

Le rapport mentionne que :

³ Conception assistée par ordinateur

« Cette position n'est pas très élevée, considérant la hauteur déployée qui est de l'ordre de 4 m, ce qui est attendu puisque la majeure partie de la masse est contenue dans la base de la machine. Une telle conception offre une bonne stabilité de la base, tout en maintenant une masse relativement raisonnable de l'ensemble, pour faciliter le transport de la machine.

La largeur de la machine est significativement plus faible que son empattement (76 cm vs 132 cm). Mis à part le faible décalage longitudinal provoqué par l'élévation du ciseau, le centre de masse est pratiquement au centre du plan délimité par les quatre roues. Il est situé à une hauteur de 1.168 m par rapport au sol. Pour de faibles hauteurs d'élévation de l'une des quatre roues par rapport à la hauteur du centre de masse, le soulèvement d'une seule roue provoque une inclinaison dans le sens de la largeur de la plateforme, c'est-à-dire tel qu'illustré sur la figure 2. Évidemment, le soulèvement de deux roues situées du même côté provoque également une telle inclinaison dans le sens de la largeur. Pour la géométrie de la plateforme élévatrice telle que déployée au moment de l'accident, le renversement s'est produit de côté, tel qu'illustré sur la figure 2, invariablement du fait qu'il y avait une ou deux roues soulevées. »

4.2.6.2 Angle limite de stabilité

L'angle limite de stabilité lorsque la plateforme est élevée à 3,6m (12 pieds) est 18 degrés. Cette limite est atteinte lorsque la roue de la plateforme s'élève à 23,5 cm (9,2 po) tel que montré à la figure 6.



Source : Rapport d'expertise

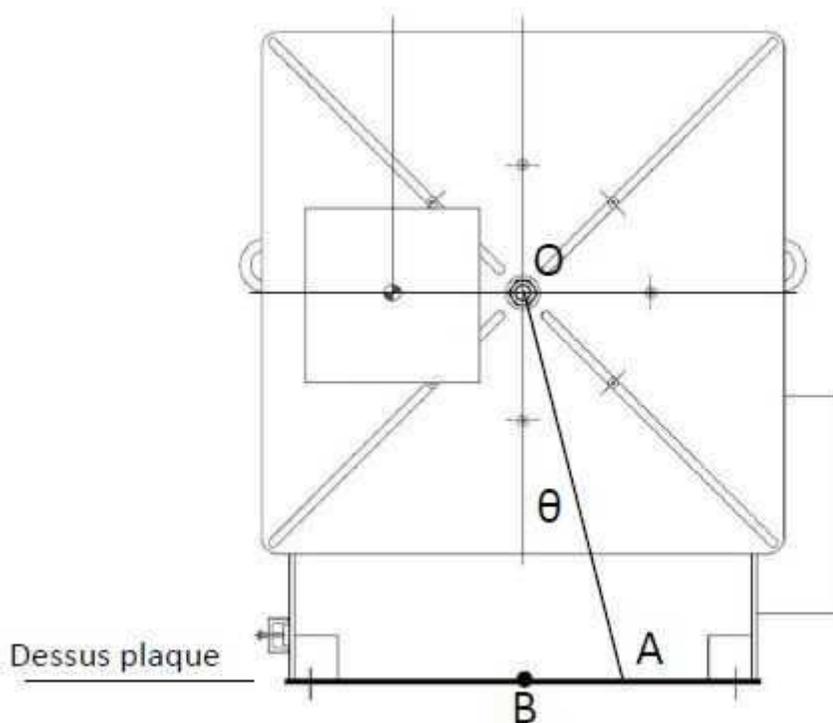
Figure 6 : Inclinaison à l'angle limite de stabilité. Le centre de masse est exactement au-dessus du point A, dimensions en mm

Dans le rapport, il est précisé que :

« Cet angle est calculé en supposant une position centrée du travailleur sur la plateforme, mais l'inclinaison pouvant provoquer une perte d'équilibre du travailleur, il est possible que celui-ci ait glissé ou se soit déplacé dans la direction du basculement, accentuant le déséquilibre de la machine. »

4.2.6.3 Dynamique du soulèvement de la plaque

La distance entre le centre du plateau tournant du positionneur et l'extrémité du support de montage inutilisé qui est venu en contact avec la plaque est de 229 cm (90 po), soit la distance OA sur la figure 7. Celle entre le centre du plateau et la plaque est de 220 cm (86,5 po), ce qui correspond à la distance OB sur la figure 7. Ainsi, le potentiel de conflit maximal possible entre l'extrémité du support et la plaque est de 9 cm (3,5 po). Lorsque le support touche la plaque et suit sa trajectoire circulaire, il y a fléchissement et déflexion de la plaque.



Source : Rapport d'expertise

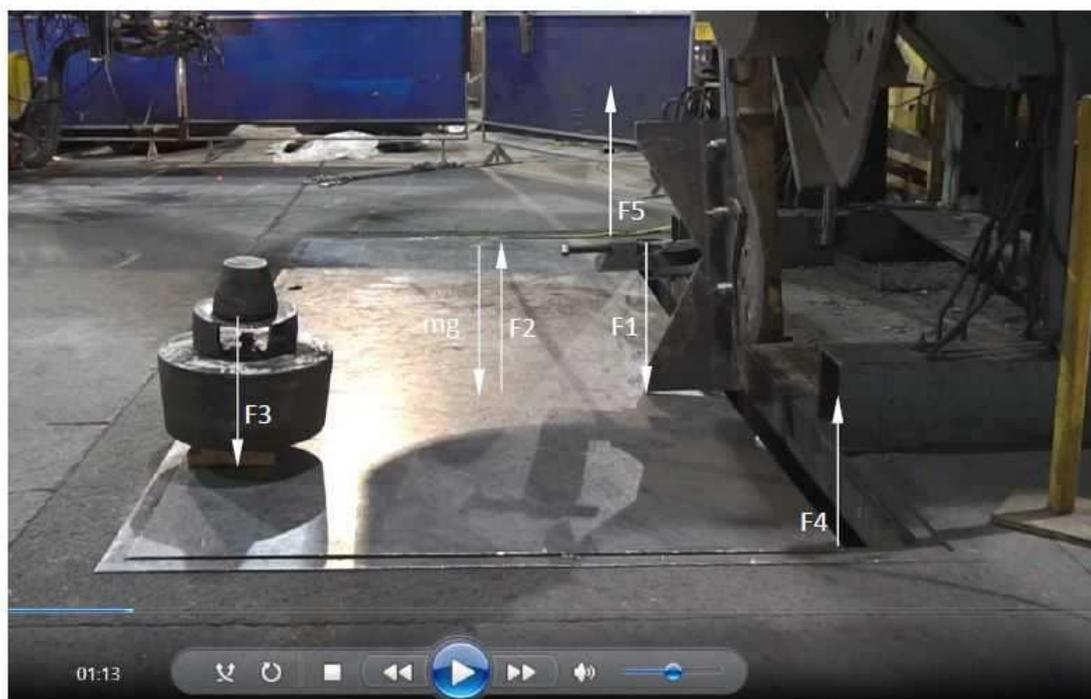
Figure 7 : Positionneur Aronson HD 500, vue de face (élévation)

La force verticale pouvant être produite par le positionneur, selon la trajectoire du support de montage, varie de 2422 à 2011 kg. La plateforme élévatrice a une masse de 1336 kg (avec le travailleur et ses outils). Ainsi, la force requise pour la soulever d'un seul côté est d'environ

668 kg. Les forces disponibles du positionneur dépassent celles requises pour déformer et contrebalancer la plaque, ainsi que pour excéder la masse de la plateforme élévatrice. La hauteur atteinte par le grand côté de la plaque qui se soulève est supérieure à 23,5 cm (9,2 po). Cette hauteur est suffisante pour provoquer le basculement et le renversement de la plateforme élévatrice.

Les poteaux ont offert du soutien à la plaque, mais en même temps ils ont servi de pivot ayant pour effet la rotation de la plaque. Il est mentionné dans le rapport que :

« Au point le plus bas, la force horizontale disponible est égale à la force tangentielle, soit 19 773 N tandis que la force requise pour vaincre le frottement est maximale, et sa valeur est 3993 N. On constate donc que la force disponible est, pour toutes les positions, amplement suffisante pour vaincre le frottement et provoquer la déformation de la plaque. Puisque la force disponible excède largement la force requise pour vaincre le frottement, la réserve de force encore disponible peut faire un autre travail, comme par exemple élever une masse.



Source : Rapport d'expertise

Photo 22 : Image tirée de la simulation au moment où le support entre en contact avec la plaque métallique

La position exacte des poteaux dans la fosse n'est pas connue, mais il est raisonnable de supposer qu'ils étaient situés approximativement au centre dans le sens de la largeur. La force verticale F3 produite pour soulever la masse à cet endroit (près du grand côté opposé, à gauche sur l'image) est donc d'amplitude similaire à la force imposée à l'emplacement du support du positionneur (F1) puisque les bras de levier sont similaires de part et d'autre du support central (F2). La force requise en F1 pour soulever la plateforme d'un seul côté est donc de l'ordre de 668 kg.

On constate donc que la force verticale disponible au point où est identifiée la force F1 (2422 à 2011 kg) est amplement suffisante à contrebalancer et excéder la masse de la plateforme élévatrice, provoquer son inclinaison et son renversement. »

L'énergie que peut fournir le positionneur 61 est plus grande que celle requise pour déformer la plaque recouvrant la fosse et soulever la plateforme élévatrice, tel qu'il est précisé dans le rapport :

« On constate que l'énergie requise pour soulever la machine et la faire basculer est faible comparée à l'énergie que peut fournir le positionneur. La somme de l'énergie requise pour soulever la machine et celle requise pour déformer la plaque, $733 \text{ J} + 222 \text{ J} = 955 \text{ J}$ est bien en deçà de l'énergie disponible de $12\,647 \text{ J}$.

Ceci nous permet de conclure que le travail consistant à la déformation de la plaque, qui a ensuite agi comme levier soulevant un côté de la machine et provoquant son renversement, constituait une faible fraction (environ 8%) de l'énergie pouvant être produite par le positionneur. »

Le temps écoulé entre le contact du support de montage avec la plaque et le renversement de la plateforme fut d'environ 13-14 secondes, tel qu'il l'est affirmé dans l'expertise:

« Le temps de 20 secondes correspond à une élévation de 35 cm, alors que la hauteur critique de renversement est de 23.5 cm. On peut donc supposer que le temps entre le début de l'élévation et le renversement, lors de l'accident, fut plutôt de l'ordre de 13 ou 14 secondes.

Le mouvement fut probablement difficile à percevoir pendant une fraction significative des 13 ou 14 secondes qu'il dura. »

Parmi les conclusions de l'expert, notons notamment la suivante :

« Au terme de cette étude, il apparaît que le positionneur, dans les conditions qui prévalaient lors de l'accident, présentait un couple disponible permettant de conférer au support fixé au positionneur une trajectoire et une force suffisante pour :

- imposer à la plaque d'acier une force verticale causant sa déflexion suivant le mouvement circulaire du support fixé au positionneur;*
- imposer à la plaque d'acier une force suffisante pour causer sa rotation sur le pivot constitué des poteaux présents sous la plaque dans la fosse, et ainsi soulever la ou les roues de la plateforme élévatrice positionnées sur la plaque;*
- élever cette ou ces roues à une position telle que le centre de masse de la machine excéda la position de stabilité et provoqua le renversement de la machine. »*

4.2.7 Réglementation et normes applicables

La Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) précise les obligations de l'employeur et du travailleur.

À l'article 51, la LSST stipule entre autres que :

« L'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour protéger la santé et assurer la sécurité et l'intégrité physique du travailleur. Il doit notamment :

1° s'assurer que les établissements sur lesquels il a autorité sont équipés et aménagés de façon à assurer la protection du travailleur;

[...]

3° s'assurer que l'organisation du travail et les méthodes et techniques utilisées pour l'accomplir sont sécuritaires et ne portent pas atteinte à la santé du travailleur;

[...]

5° utiliser les méthodes et techniques visant à identifier, contrôler et éliminer les risques pouvant affecter la santé et la sécurité du travailleur;

[...]

9° 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;

[...] ».

L'article 49 de la LSST décrit les obligations du travailleur. Il stipule entre autres que :

« Le travailleur doit :

[...]

2° prendre les mesures nécessaires pour protéger sa santé, sa sécurité ou son intégrité physique;

3° veiller à ne pas mettre en danger la santé, la sécurité ou l'intégrité physique des autres personnes qui se trouvent sur les lieux de travail ou à proximité des lieux de travail;

[...] ».

Norme CSA B354.2-01 Plates-formes de travail élévatrices automotrices :

« 6. Pratiques de conduite prudente

6.1 Généralités

La conduite prudente de la plateforme élévatrice inclut :

a) la sélection d'une plateforme élévatrice appropriée en ce qui concerne la capacité, la portée, la surface d'utilisation compactée ou non et l'environnement ;

b) un opérateur compétent formé en matière d'inspection, d'application et de conduite de la plateforme élévatrice ;

c) le contrôle et (ou) la réduction au minimum des risques.

6.2 Inspection du lieu de travail

Avant et durant l'utilisation de la plateforme élévatrice, l'endroit où la plateforme élévatrice sera utilisée doit être inspecté à la recherche des risques possibles suivants, sans toutefois s'y limiter :

- a) les fondrières ou les trous ;*
- b) les pentes ;*
- c) les bosses et les obstacles sur le sol ;*
- d) les débris ;*
- e) les obstacles en hauteur et les fils électriques ;*
- f) les atmosphères dangereuses ;*
- g) la surface et la résistance du sol inadéquats pour résister à la charge qu'impose la plateforme élévatrice dans toutes ses configurations ;*
- h) la vitesse du vent et les conditions météorologiques ;*
- i) toute autre condition dangereuse possible. »*

Norme CSA B354.7-17 Plates-formes élévatrices mobiles de travail - Principes de sécurité, inspection, maintenance et fonctionnement (traduction libre de l'anglais) :

« 6.8.2 Conditions du sol

6.8.2.1

La stabilité des plates-formes élévatrices mobiles de travail et leur sécurité sont affectées par des conditions inappropriées du sol (surface) qui peuvent entraîner leur déséquilibre et l'instabilité. Si l'indicateur de niveau indique que les limites de fonctionnement approchent des limites spécifiques aux plates-formes élévatrices mobiles de travail, l'opérateur doit alors abaisser et réinitialiser la machine sur une surface de niveau.

[...]

6.8.2.3

La résistance de la surface de support, en tenant compte des vides souterrains tels que les caves, les sous-sols et les tuyaux, doit être prise en considération lors de l'utilisation d'une plateforme élévatrice mobile de travail.

[...]

6.8.17

L'opérateur doit s'assurer que la zone entourant la plateforme élévatrice mobile de travail est exempte de personnes et d'équipements avant d'élever, d'abaisser ou de faire pivoter (le cas échéant) la plateforme. »

Norme CSA B354.8-17 Plates-formes élévatrices mobiles de personnel (PEMP) - Formation des opérateurs (conducteurs) :

« 6 Contenu de la formation

6.1 Formation de base

L'opérateur doit être formé sur:

a) l'évaluation des risques liés aux tâches à exécuter et au site où ses tâches doivent être réalisées (voir l'ISO 18893:—, Article 6 et Annexe A)1), y compris l'inspection quotidienne des sites de travail;

b) le choix de la PEMP appropriée;

c) l'objet, l'utilisation et le contenu des manuels de l'opérateur fournis par le fabricant, les avertissements et les instructions ainsi que les règles de sécurité applicables;

d) l'emplacement et le rangement des manuels de l'opérateur fournis par le fabricant et l'importance de les garder dans un compartiment de stockage protégé des aléas climatiques lorsque la PEMP n'est pas en fonctionnement;

e) l'inspection de pré-fonctionnement (voir l'ISO 18893);

f) les facteurs affectant la stabilité (voir l'ISO 18893);

g) les phénomènes dangereux et la façon de les éviter (voir l'ISO 18893);

h) la connaissance générale de l'objet et de la fonction de toutes les commandes de la PEMP, y compris les commandes de secours;

i) la façon de résoudre les problèmes ou dysfonctionnements affectant le fonctionnement de la PEMP;

j) l'utilisation des équipements de protection individuelle (EPI) appropriés à la tâche, au site de travail et à l'environnement;

k) le déplacement sûr;

l) le transport (si approprié);

m) la mise en sécurité de la PEMP contre toute utilisation non autorisée;

n) la façon d'obtenir l'assistance d'une personne au sol;

o) l'importance d'être familiarisé avec les particularités liées au type et au modèle avant le fonctionnement de la PEMP;

p) le fonctionnement d'une PEMP.

NOTE Les conditions locales ou les instructions du fabricant peuvent exiger que d'autres sujets soient ajoutés. »

4.3 Énoncés et analyse des causes

4.3.1 La plateforme élévatrice, déstabilisée par le soulèvement de la plaque sur laquelle elle repose en partie, se renverse.

Le soir de l'accident, M. [E] est affecté au soudage d'un raccord au poste du manipulateur 60 et du positionneur 61. Le soudage du raccord débute lors du quart de jour. Avant de procéder au soudage, [C] installe le raccord sur le positionneur 61, en le fixant à l'aide de deux supports de montage. Deux autres supports de montage qui avaient été soudés sur le positionneur lors d'un travail précédent demeurent sur le positionneur, sans être repositionnés. Ces supports sont opposés au raccord. Le soudeur effectue le soudage au sol du petit côté du raccord.

Au moment où [E] arrive à son poste de travail, le raccord est dans une position verticale à gauche du plateau du positionneur. Une rangée de cinq poteaux se trouve dans la fosse juxtaposée au positionneur et une plaque métallique y est déposée. Étant donné qu'il doit souder le grand côté du raccord en hauteur, il prend place sur une plateforme élévatrice. Au moins une roue de la plateforme élévatrice repose sur la plaque de la fosse afin de permettre au travailleur de s'approcher du raccord à souder.

Alors que la plateforme élévatrice est déployée à 3,7 m (12 pi), le soudeur fait tourner en sens horaire le plateau du positionneur pour placer le raccord en haut, dans une position horizontale lui permettant de réaliser les travaux. L'extrémité d'un des supports de montage inutilisé fixé au positionneur dépasse la hauteur libre au-dessus de la plaque recouvrant la fosse. Cette hauteur correspond à la distance entre le centre du plateau du positionneur et le dessus de la plaque. Ainsi, lors de la rotation, ce support entre en contact avec la plaque. L'expertise jointe en annexe confirme que le positionneur engendre une force suffisante pour causer la déflexion de la plaque et sa rotation sur les poteaux présents sous la plaque qui jouent un rôle de pivot. Ainsi, lorsqu'un côté de la plaque s'abaisse, le côté opposé s'élève.

Les poteaux offrent du soutien à la plaque, mais leur disposition permet le soulèvement de celle-ci.

Les mesures prises et la trace de pneu sur la plaque mettent en évidence que la roue arrière droite était placée sur la plaque, alors que l'autre roue du même côté, soit la roue avant droite se situait sur le bord de la plaque ou à proximité.

Au moins l'une des roues de la plateforme élévatrice est positionnée sur la plaque métallique, donc le soulèvement de la plaque entraîne aussi le soulèvement de cette roue par la plaque. Selon la hauteur d'utilisation de la plateforme et la position du centre de masse, la limite de stabilité de la plateforme est atteinte lorsque la roue de la plateforme s'élève à 23,5 cm (9,2 po). Vu que la hauteur atteinte par le grand côté de la plaque qui se soulève est supérieure à la hauteur maximum d'équilibre de la plateforme, cela provoque le basculement et la chute sur le côté de cette dernière, dans le sens de sa largeur.

Selon l'expert M. Jean Ruel, ing., Ph. D., le soulèvement d'une seule ou de deux roues du même côté peut provoquer une inclinaison dans le sens de la largeur de la plateforme. Au moment de l'accident, le renversement de la plateforme s'est produit de côté, invariablement du fait qu'il y avait une ou deux roues soulevées.

Lorsque la plateforme élévatrice se renverse sur le côté, le travailleur est projeté hors de la plateforme, sur le plancher en béton. Il décède quelques heures plus tard des suites de ses blessures.

Le fait que le positionneur a été retrouvé en rotation antihoraire, alors que le support de montage tournait en sens horaire lorsqu'il est entré en contact avec la plaque, peut être expliqué par le fait que le soudeur, en remarquant le déséquilibre de sa plateforme, a procédé au changement du sens de rotation du positionneur avant que la plateforme se renverse et qu'il soit projeté au sol. L'expertise réalisée démontre que le temps entre le début de l'élévation et le renversement de la plateforme est estimé à 13 ou 14 secondes. Malgré le fait que le mouvement fut probablement difficile à percevoir pendant une majeure partie de ce temps, ce laps de temps aurait pu permettre au soudeur d'inverser le sens de rotation du positionneur.

Cette cause est retenue.

4.3.2 La gestion des travaux de soudage en hauteur est déficiente en ce qui a trait à l'identification des dangers et à l'application des mesures préventives liées à l'utilisation d'une plateforme de travail élévatrice.

Avant d'entreprendre des travaux avec une plateforme de travail élévatrice automotrice, il importe de bien planifier les différentes tâches à exécuter pour travailler en toute sécurité et de vérifier l'environnement de travail afin d'évaluer les risques pouvant entraîner l'instabilité de l'équipement.

Les plateformes de travail élévatrices automotrices sont sécuritaires, à condition que leur utilisation soit conforme aux règles de sécurité précisées par le fabricant ainsi qu'à celles édictées par la réglementation et les normes.

La plateforme élévatrice doit être utilisée seulement sur une surface stable et à niveau. L'instabilité est accentuée lorsque la plateforme est déployée.

En juin 2019, l'employeur a décidé de retirer les sièges des manipulateurs et d'utiliser des plateformes de travail élévatrices pour les travaux de soudage. Aucune analyse de risques n'a été effectuée à la suite de ces changements.

À la suite de l'utilisation des plateformes élévatrices au département de soudure, des poteaux ont été installés sous la plaque recouvrant la fosse juxtaposée au positionneur 61 afin de supporter les plateformes élévatrices. La charge exacte pouvant être supportée par la plaque sans compromettre sa stabilité n'était pas connue au moment de l'accident.

Le jour de l'accident, les poteaux ont été installés par [C] et leur disposition a été choisie en vue de la coupe de la plaque. C'était la première fois qu'un raccord hors rayon ayant un diamètre de 48 pouces était soudé depuis l'implantation des plateformes élévatrices. Des discussions portant sur la possibilité de couper ou de remplacer la plaque afin de permettre la rotation complète du raccord ont eu lieu. Dans l'évaluation de la méthode de travail, la possibilité du positionneur à effectuer une rotation complète sans que le raccord entre en contact avec la plaque et la capacité de la plaque ont été considérées, sans toutefois tenir compte de la position des supports de montage. Le danger de contact entre les supports de montage opposés au raccord à souder et la

plaque recouvrant la fosse en avant du positionneur n'a pas été identifié. De plus, il n'y a pas eu d'échange d'information sur les supports de montage inutilisés et donc ils n'ont pas été retirés ni repositionnés. Le travail a débuté sans couper la plaque.

C'était une pratique courante dans l'usine de conserver sur le positionneur des supports de montage qui ne maintiennent pas de charge afin de créer un contrepoids supplémentaire.

Le cartable comprenant des indications et des photos relatives à l'emplacement des supports de montage sur le plateau du positionneur ne fait aucune référence à la longueur maximale des supports ni au danger potentiel d'interférence avec la plaque recouvrant la fosse.

Il est déjà arrivé dans le passé qu'un support de montage entre en contact avec la plaque, celle-ci présentant des traces à cet effet. Ces événements se sont passés alors qu'aucun équipement ne prenait place sur la plaque et n'ont pas entraîné de conséquence.

De plus, aucune vérification du montage n'a été effectuée avant le début des travaux de soudage afin d'identifier les risques potentiels. Une directive verbale selon laquelle, à la suite de l'installation du raccord, les soudeurs doivent effectuer une rotation complète du raccord avant de monter dans la plateforme élévatrice et commencer la soudure est en place. Toutefois, cette consigne n'est pas connue ni rigoureusement mise en application par tous les soudeurs. Aucun moyen de contrôle de l'application n'est déterminé et personne ne s'assure de façon structurée du respect de cette directive.

Le soir de l'accident, les mesures prises n'ont pas été suffisantes pour assurer l'utilisation sécuritaire des équipements en interaction les uns avec les autres et n'ont pu prévenir le renversement de la plateforme élévatrice. Des mesures adéquates et efficaces pour identifier, éliminer ou contrôler les risques liés à l'utilisation de la plateforme élévatrice auraient dû être mises en place. Une démarche structurée visant à contrôler l'application et le respect de ces mesures aurait également dû être mise en place.

Cette cause est retenue.

SECTION 5

5 CONCLUSION

5.1 Causes de l'accident

L'enquête a permis de retenir les causes suivantes pour expliquer cet accident :

- La plateforme élévatrice, déstabilisée par le soulèvement de la plaque sur laquelle elle repose en partie, se renverse.
- La gestion des travaux de soudage en hauteur est déficiente en ce qui a trait à l'identification des dangers et à l'application des mesures préventives reliées à l'utilisation d'une plateforme de travail élévatrice.

5.2 Autres documents émis lors de l'enquête

À la suite de l'accident de travail, la CNESST a interdit les travaux d'installation et de soudage au poste du manipulateur 60 et du positionneur 61 ainsi qu'au poste du manipulateur 572 et du positionneur 149 (RAP1291251 daté du 15 janvier 2020).

L'employeur nous a soumis certains documents rédigés par des ingénieurs et a mis en place des mesures spécifiques aux postes du manipulateur 572, positionneur 149, manipulateur 60 et positionneur 61, notamment les certificats de capacité des plaques métalliques, l'analyse structurale de la capacité des positionneurs et des barrures, une procédure de travail sécuritaire pour les travaux d'installation et de soudage de raccords, le certificat de sécurité des positionneurs et manipulateurs, la formation des travailleurs concernés, un programme de maintenance préventive et des moyens de contrôle. Ainsi, le 28 janvier 2020, la CNESST autorise les travaux d'installation et de soudage des raccords sur rayon au poste du manipulateur 572 et du positionneur 149 (RAP1292606). Le 25 février 2020, la CNESST autorise les travaux d'installation et de soudage pour raccords linéaires seulement au manipulateur 60 (RAP1295899). Le 18 mars 2020, la CNESST autorise la reprise des travaux de soudage pour raccords sur rayon au positionneur 61 (RAP1298257). Le soudage hors rayon demeure interdit aux postes du manipulateur 572, positionneur 149, manipulateur 60 et positionneur 61.

Des correctifs empêchant l'accès aux pièces en mouvement des manipulateurs 572 et 60 et des positionneurs 149 et 61 ont été également exigés.

5.3 Recommandations (ou Suivi de l'enquête)

La CNESST transmettra les conclusions de son enquête aux associations suivantes pour qu'elles informent leurs membres de ses conclusions :

- Association de location du Québec;
- Association de la construction du Québec;
- Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec;

- Association québécoise des entrepreneurs en infrastructure;
- Association patronale des entreprises en construction du Québec;
- Association des entrepreneurs en construction du Québec;
- Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec;
- Les associations sectorielles paritaires;
- Les mutuelles de prévention.

Le rapport d'enquête sera aussi diffusé dans les établissements de formation qui offrent les programmes d'études de bâtiments et travaux publics, entretien général d'immeubles et mécanique industrielle de construction et d'entretien.

ANNEXE A**Accidenté**

Nom, prénom : [E]
Sexe : [...]
Âge : [...]
Fonction habituelle : [...]
Fonction lors de l'accident : soudeur
Expérience dans cette fonction : [...]
Ancienneté chez l'employeur : [...]
Syndicat : [...]

ANNEXE B**Liste des témoins et des autres personnes rencontrées****Témoins rencontrés :**

M. [C], [...], Ezeflow inc.
M. [K], [...], Ezeflow inc.
M. [L], [...], Ezeflow inc.
M. [D], [...], Ezeflow inc.
M. [F], [...] Ezeflow inc.

Personnes rencontrées :

M. [M], [...], Ezeflow inc.
Mme Marie-Andrée Boutin, agente, Sûreté du Québec, division de l'identité judiciaire de l'Estrie
M. [U], [...], Ezeflow inc.
M. [N], [...], Services de grues Yves Chouinard inc.
M. [G], [...], Ezeflow inc.
M. [O], [...], Ezeflow inc.
M. [P], [...], Lou-Tec Industriel
M. Lucas Melançon-Dubois, enquêteur, Service de police de la ville de Granby
M. [Q], [...], Ezeflow inc.
M. [A], [...], Ezeflow inc.
M. [R], [...]
Mme [S], [...], Ezeflow inc.
M. [T], [...], ABMS Consultants inc.
M. [I], [...], Ezeflow inc.

ANNEXE C

Rapport d'expertise réalisé par M. Jean Ruel, ing., Ph. D.

Expertise sur le renversement d'une plate-forme élévatrice de type ciseau

réalisée pour le
Service de la prévention-inspection, Montérégie-Est, Direction de la
prévention-inspection Centre-sud 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

17 juin 2020

Introduction

Ce rapport est la réalisation d'un mandat qui m'a été confié le 23 avril 2020 par le Service de la prévention-inspection, Montérégie-Est, Direction de la prévention-inspection Centre-sud 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 de type ciseau a été victime d'une chute suite au renversement de la plate-forme.

Le mandat est décrit brièvement dans le document intitulé « DEMANDE DE SOUMISSION - Expertise sur le renversement d'une plate-forme élévatrice de type ciseau » produit par le Service de la prévention-inspection, Montérégie-Est, Direction de la prévention-inspection Centre-sud de la CNESST. D'autres documents, des photographies et une vidéo de simulation m'ont été fournis pour réaliser l'expertise.

Le mandat d'expertise comportait les trois éléments suivants :

- 1) représenter la plate-forme avec positionnement du centre de gravité selon la hauteur de déploiement au moment de l'accident en vue de déterminer la ligne de renversement et les conditions de stabilité avec une roue soulevée;
- 2) déterminer la force minimale à exercer sur le couvercle pour provoquer le renversement de la plate-forme, en tenant compte de la disposition des poteaux sous le couvercle, du déplacement minimal requis de la roue de la plate-forme et du lieu d'application de la force exercée par le support;
- 3) évaluer le déroulement du renversement de la plate-forme en fonction du temps compte tenu de la vitesse d'application de la force pour atteindre le point de renverse.

Le présent rapport répond aux points énumérés ci-dessus.

Analyse technique

Modèle CAO

Afin d'étudier la stabilité de la plate-forme élévatrice, un modèle CAO (conception assistée par ordinateur) a été réalisé afin de connaître la distribution spatiale de ses caractéristiques massiques. Ceci a permis le calcul de la position du centre de masse dans sa configuration selon la hauteur de déploiement au moment de l'accident.

Les dimensions et les propriétés massiques des différents éléments composant la plate-forme GS-1930 ont été déterminés à partir des relevés et des documents qui m'ont été fournis, ainsi qu'à partir de certaines informations complémentaires fournies sur demande.

Ce modèle est représenté à la figure 1.

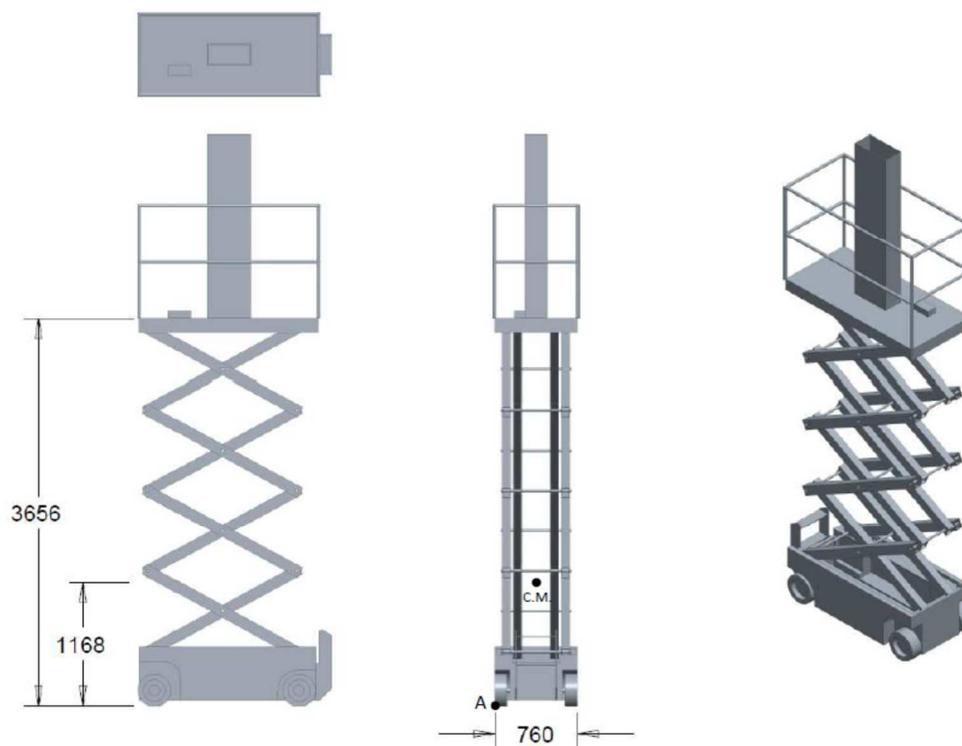


Figure 1. Modèle CAO de la plate-forme élévatrice GS-1930, dimensions en mm.

Dans ce modèle :

- une forme prismatique a été incluse sur la plate-forme. Elle présente une masse de 80 kg et une hauteur de 1.75 m, afin de tenir compte de la présence du travailleur sur la plate-forme dans le calcul du centre de masse de l'ensemble;

- une masse de 10 kg a également été déposée sur la plate-forme pour représenter les outils;
- la plate-forme elle-même (la nacelle) présente une masse de 119 kg;
- Les barres qui constituent le ciseau et les tiges de liaison présentent des masses équivalentes à ces éléments;
- La masse de la machine complète, excluant le travailleur et ses outils, est de 1246 kg.
- La surface de la plate-forme est positionnée à 3.656 m (12 pieds) par rapport au sol.

Avec ce modèle, la position du centre de masse a été calculée, elle se situe à une hauteur de 1.168 m par rapport au sol. Cette position n'est pas très élevée, considérant la hauteur déployée qui est de l'ordre de 4 m, ce qui est attendu puisque la majeure partie de la masse est contenue dans la base de la machine. Une telle conception offre une bonne stabilité de la base, tout en maintenant une masse relativement raisonnable de l'ensemble, pour faciliter le transport de la machine.

L'élévation du ciseau provoque aussi un léger déplacement du centre de masse dans le sens de la longueur de la machine, mais puisque la masse des barres constituant le ciseau constitue une fraction peu élevée de la masse totale (environ 220 kg par rapport à 1246 kg), et qu'elles se déplacent modérément dans le sens de la longueur de la machine lors de l'élévation, cette translation du centre de masse dans le sens de la longueur est faible. À titre d'exemple, pour la configuration de 12 pieds de hauteur, le centre de masse se situe à seulement 4.6 cm de la position médiane entre les roues avant et les roues arrière, alors que la distance entre les axes de ces roues (l'empattement) est de 132 cm.

La largeur de la machine est significativement plus faible que son empattement (76 cm vs 132 cm). Mis à part le faible décalage longitudinal provoqué par l'élévation du ciseau, le centre de masse est pratiquement au centre du plan délimité par les quatre roues. Il est situé à une hauteur de 1.168 m par rapport au sol. Pour de faibles hauteurs d'élévation de l'une des quatre roues par rapport à la hauteur du centre de masse, le soulèvement d'une seule roue provoque une inclinaison dans le sens de la largeur de la plate-forme, c'est-à-dire tel qu'illustré sur la figure 2. Évidemment, le soulèvement de deux roues situées du même côté provoque également une telle inclinaison dans le sens de la largeur. Pour la géométrie de la plate-forme élévatrice telle que déployée au moment de l'accident, le renversement s'est produit de côté, tel qu'illustré sur la figure 2, invariablement du fait qu'il y avait une ou deux roues soulevées.

Lorsqu'un tel soulèvement se produit, l'angle de la droite reliant l'extrémité d'une roue de la machine (point A sur la figure 2) et le centre de masse représente la limite de stabilité au-delà de laquelle le centre de masse passe à l'extérieur de la ligne de contact des roues, provoquant le basculement et la chute de la machine.

Cet angle, représenté à la figure 2, s'exprime par la relation $\tan \theta = 380 \text{ mm} / 1168 \text{ mm}$ et la valeur de cet angle est 18 degrés. C'est l'angle limite de stabilité pour la configuration étudiée, c'est-à-dire une élévation de 12 pieds de la plate-forme.

Cet angle est calculé en supposant une position centrée du travailleur sur la plate-forme, mais l'inclinaison pouvant provoquer une perte d'équilibre du travailleur, il est possible que celui-ci ait glissé ou se soit déplacé dans la direction du basculement, accentuant le déséquilibre de la machine.



Figure 2. Inclinaison à l'angle limite de stabilité. Le centre de masse est exactement au-dessus du point A, dimensions en mm.

En ce qui concerne la hauteur requise d'élévation de la roue de droite pour atteindre cet angle, elle s'exprime par la relation

$$h = 760 \sin 18^\circ$$

et cette hauteur est $h = 23.5 \text{ cm} = 9.2 \text{ po.}$

Forces produites par le positionneur

Le positionneur impliqué dans l'accident est de marque Aronson et le modèle est le HD500. La plaque signalétique de l'appareil indique un couple maximal de 600 000 lb.in en rotation, et 1 037 000 lb.in en inclinaison. Le mouvement impliqué dans l'accident est la rotation, et celui-ci consiste en une rotation de la table de fixation autour de son centre géométrique (point O sur la figure 3).

Une partie de ce couple est utilisée pour l'élévation du coude présent sur le positionneur. Un contrepoids est également présent. Les relevés fournis mentionnent un poids de 5577 lbs pour le coude et 1600 lbs pour le contrepoids. D'après les positions du coude et du contrepoids observables sur la photo 2020-01-14 MA (19), j'estime que le couple nécessaire à l'élévation du coude est de l'ordre de 200 000 lbs.in (5577 lbs – 1600 lbs à un rayon d'environ 50 pouces), et

donc qu'il reste 400 000 lb.in disponibles du couple produit par le moteur de rotation du positionneur.

Également sur les relevés dimensionnels qui m'ont été fournis, la distance mesurée à partir du centre de la table de rotation jusqu'à l'extrémité du support laissé en place et venu en contact avec la plaque est de $r = 90$ pouces (distance OA sur la figure 3). Avec le couple de rotation disponible $C = 400\,000$ lb.in (45 200 Nm), la force tangentielle maximale F pouvant être produite à l'extrémité du support peut être calculée :

$$C = F \times r, \text{ donc } F = C / r = 400\,000 \text{ lb.in} / 90 \text{ in} = 4444 \text{ lbs} = 2016 \text{ kg} = 19\,773 \text{ N}$$

Également sur les relevés dimensionnels fournis, il est indiqué que la hauteur libre entre le centre de rotation du positionneur et le dessus de la plaque d'acier est de 86.5 pouces (distance OB sur la figure 3). Il y a donc un potentiel de conflit maximal possible de $90 - 86.5 = 3.5$ pouces entre l'extrémité du support et la plaque d'acier, lorsque le support est à son point le plus bas.

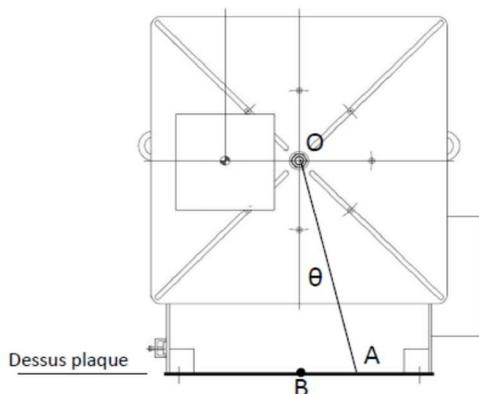


Figure 3. Positionneur Aronson HD 500, vue de face (élévation).

L'angle entre le rayon sur lequel se trouve le support (OA) lorsqu'il entre en contact avec la plaque et la ligne verticale descendant sous l'axe de rotation (OB) est donné par l'équation

$$90 \text{ po} \times \cos \theta = 86.5 \text{ po}$$

où 90 pouces est la valeur de l'extrémité du support par rapport au centre de rotation, et 86.5 pouces est la distance verticale entre l'axe de rotation et le dessus de la plaque d'acier. La valeur de cet angle est de 16 degrés (0.28 radian).

Lorsque le support touche la plaque, afin que le mouvement puisse se poursuivre, il doit y avoir fléchissement et déflexion de la plaque pour laisser libre cours au passage du support du positionneur, qui suit une trajectoire circulaire autour du centre O.

En fonction de l'angle θ (figure 3), la déflexion requise à chaque position angulaire θ s'exprime par

$$\delta = 90 \text{ po} \times \cos \theta - 86.5 \text{ po}$$

Cette déflexion est nulle au premier point de contact, et augmente progressivement jusqu'à une valeur de 3.5 po (0.0889 m) à $\theta = 0$ degrés (point le plus bas).

Pendant ce mouvement, il y a équilibre entre les forces suivantes : soumise à une déflexion imposée par le support, la plaque produit une force de réaction verticale vers le haut, qui augmente avec l'augmentation de la déflexion. Il en résulte une force de frottement horizontale qui doit être vaincue par le couple disponible du moteur pour que se poursuivent le mouvement et l'augmentation de la déflexion de la plaque.

Considérant la plaque d'acier comme une poutre, et faisant l'hypothèse que toute la largeur de la plaque se déforme de cette amplitude (ce qui est conservateur comme hypothèse et sera discuté plus loin), la relation entre la force F et la déflexion δ correspondante s'exprime par la relation

$$\delta = F L^3 / 48 E I$$

où L est la portée de la poutre (144 po = 3.658 m), E est le module de Young du matériau (pour l'acier $E = 200$ GPa) et I est l'inertie de section. Noter que cette équation est valide pour le cas d'une force appliquée à la demi portée de la plaque (dans le sens de la longueur), ce qui pour la présente étude est une hypothèse acceptable.

L'inertie de section I de la plaque est fonction de sa largeur $b = 66 \text{ po} = 1.676 \text{ m}$ et de son épaisseur $h = 0.5 \text{ po} = 0.0127 \text{ m}$, selon l'équation

$$I = b \times h^3 / 12 = 2.862 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Le graphique de la figure 4 présente, en fonction de l'angle θ , la valeur de la force normale requise pour produire la déflexion correspondant à la position de l'extrémité du support pour cet angle.

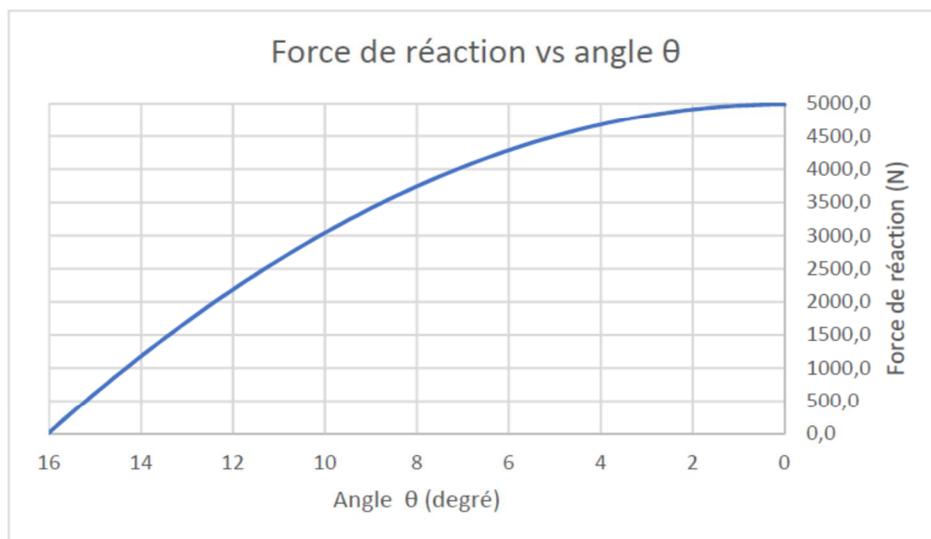


Figure 4. Force requise pour produire une déflexion à chaque position angulaire du support.

On peut y observer que la force augmente, jusqu'à une valeur maximale de 4991 N lorsque l'angle est de zéro degré, c'est-à-dire au point le plus bas.

Si l'on applique à cette force de réaction verticale le coefficient de friction statique de l'acier sur l'acier (ce qui est conservateur puisque le frottement est dynamique), qui est de l'ordre de $\mu = 0.8$, on obtient une évolution d'allure similaire à celle de la figure 4 pour la force de friction horizontale s'opposant au mouvement, mais avec une valeur maximale $F_{\text{friction}} = \mu F_{\text{max}} = 0.8 \times 4911 \text{ N} = 3993 \text{ N}$ au point le plus bas (0 degré).

Si l'on s'intéresse maintenant à la force horizontale disponible pour vaincre cette force de friction, il a déjà été calculé que la force tangentielle correspondant au couple disponible est de 19 773 N. Lors du premier contact du support et de la plaque, la composante horizontale de cette force est

$$F_H = 19773 \times \cos 16 \text{ degrés} = 19\ 007 \text{ N}$$

tandis que la force requise à ce moment est nulle puisqu'il n'y a pas encore de déflexion. Suite à ce contact, le mouvement du support cause progressivement la déflexion de la plaque, et la force de frottement augmente conséquemment.

Au point le plus bas, la force horizontale disponible est égale à la force tangentielle, soit 19 773 N tandis que la force requise pour vaincre le frottement est maximale, et sa valeur est 3993 N. On constate donc que la force disponible est, pour toutes les positions, amplement suffisante pour vaincre le frottement et provoquer la déformation de la plaque. Puisque la force disponible excède largement la force requise pour vaincre le frottement, la réserve de force encore disponible peut faire un autre travail, comme par exemple élever une masse.

Le graphique de la figure 5 présente, en fonction de l'angle, la force disponible pour produire un effet de levier vertical et soulever une masse, après avoir retranché la force requise pour vaincre la friction.

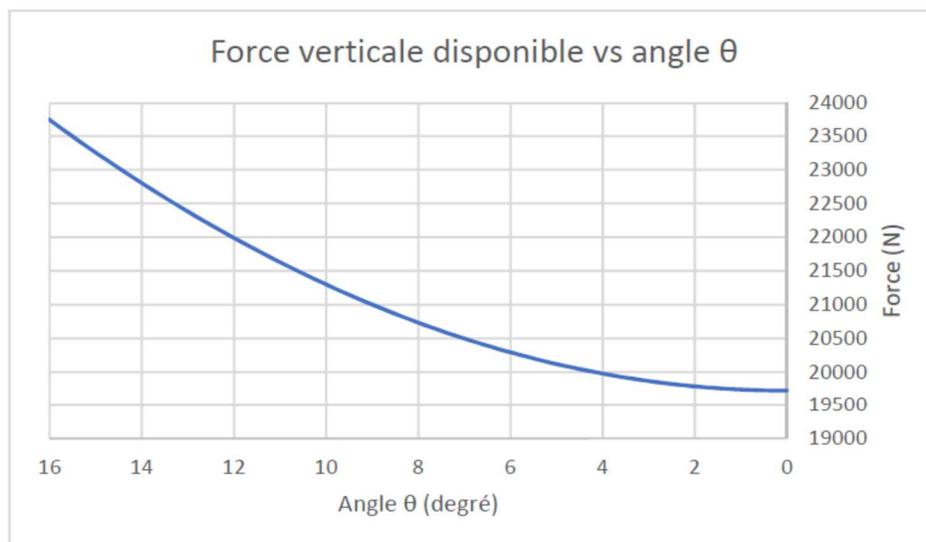


Figure 5. Force verticale disponible après soustraction de la force de frottement.

Il s'agit de la force verticale disponible, calculée en divisant par le coefficient de friction la force horizontale disponible (qui varie modérément avec l'angle, de 19 007 N à 19 773 N), puis en soustrayant la force requise pour produire la déflexion (calculée précédemment et présentée à la figure 4).

On peut constater que la force verticale disponible varie d'une valeur maximale de 23 755 N à une valeur de 19725 N au point le plus bas.

Ces valeurs seront utilisées plus loin, mais il est déjà possible de conclure que le positionneur présente un couple maximal disponible amplement suffisant pour imposer à la plaque d'acier la déflexion requise pour qu'il puisse poursuivre sans entrave son mouvement de rotation lorsque le positionneur entre en conflit avec la plaque, et que la réserve de force disponible après ce travail de déflexion de la plaque est importante (23 755 à 19725 N).

Analyse des forces en présence sur la plaque d'acier

Plusieurs données de positionnement lors de l'accident sont connues, mais avec un degré de précision variable. Cependant, il semble que des poteaux de support étaient présents dans la fosse, sous la plaque d'acier, et qu'ils devaient être positionnés approximativement à la demi-largeur de la plaque. Il semble également que la plate-forme élévatrice avait une ou deux de ses roues positionnées sur la plaque d'acier, et que le soulèvement de cette ou de ces roues par la plaque d'acier ait provoqué le renversement de la plate-forme.

Une vidéo de simulation expérimentale des conditions de l'accident a été réalisée et m'a été transmise. On peut y observer une illustration de la situation où le support fixé à la table rotative du positionneur entre en contact avec la plaque d'acier dans des circonstances similaires à celles de l'accident. L'observation de cette séquence vidéo illustre bien le comportement de la plaque lorsque le support la touche et la déforme en parcourant sa trajectoire circulaire.

La figure 6 présente une image tirée de cette vidéo, au moment où le support entre en contact avec la plaque d'acier. Sur cette image, des flèches ont été ajoutées pour illustrer les forces verticales en présence sur la plaque d'acier. Noter que seules les forces verticales sont illustrées, pour une plus grande clarté de la figure.

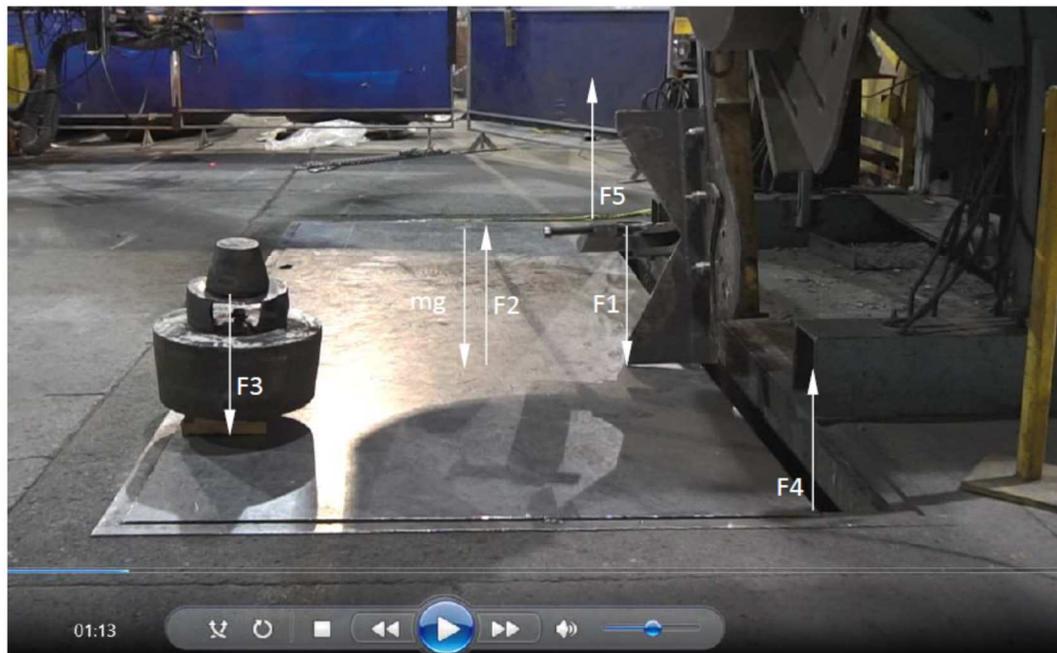


Figure 6. Image tirée de la simulation au moment où le support entre en contact avec la plaque d'acier.

La force mg est le poids de la plaque sous l'effet de la gravité. La force $F1$ est la force verticale appliquée par le support du positionneur lorsqu'il est en contact avec la plaque. La force $F2$ est le soutien offert à la plaque par les poteaux de soutien situés sous la plaque, dans la fosse. La force $F3$ est le poids déposé sur la plaque pour la simulation, et peut aussi représenter la force d'une ou deux roues de la plate-forme positionnées sur ce côté de la plaque. Finalement, les forces $F4$ et $F5$ représentent les appuis offerts aux coins de la plaque par les épaulements présents sur le périmètre de la fosse. À partir du moment où la force $F1$ cause le soulèvement du côté opposé de la plaque, ces deux coins sont les seuls endroits où la plaque est appuyée sur les épaulements de la fosse, et c'est pour cette raison que les forces $F4$ et $F5$ sont représentées à ces endroits.

Tel que mentionné précédemment et illustré sur la figure 3, au moment où le support entre en contact avec la plaque d'acier (instant représenté à la figure 6), l'angle θ entre le rayon sur lequel se trouve le support et une ligne verticale descendant sous l'axe de rotation est de 16 degrés (0.28 radian).

À partir de ce moment où le support entre en contact avec la plaque, la rotation se poursuit et la plaque subit une flexion progressive de son grand côté situé près du support du positionneur, une flexion que se produit dans la direction de sa longueur. Le support du positionneur ne semble aucunement fléchir sur les images de la vidéo, alors que la plaque d'acier se déforme au passage du support. Cette flexion est essentiellement l'effet de l'équilibre entre la force $F1$ et les deux forces aux coins de la plaque, $F4$ et $F5$. La figure 7, également tirée de la vidéo, illustre cette déformation à un autre instant, au moment où le support est très près son point le plus bas, à la verticale sous l'axe de rotation.



Figure 7. Image tirée de la simulation
à un instant où le support est près son point le plus bas.

Puisque la force F_1 est appliquée à une faible distance de l'un des grands côtés de la plaque, cette partie (à droite sur l'image) fléchit davantage que le côté opposé (à gauche sur l'image). La courbure du grand côté situé près du positionneur est donc plus importante que celle du grand côté opposé. Cette courbure tridimensionnelle confère à la plaque une plus grande rigidité qu'à son état plan. Simultanément à cette flexion sous l'effet de la force F_1 , la plaque dont l'un des grands côtés s'abaisse est supportée dans la région centrale par une force F_2 produite par les poteaux présents dans la fosse. Ce support au centre a pour effet de produire une certaine rotation de la plaque, qui se manifeste par un abaissement du grand côté situé près du positionneur (celui situé à droite sur l'image), ainsi qu'une élévation du grand côté opposé (celui situé à gauche sur l'image).

Il a été calculé précédemment et présenté à la figure 5 que la force verticale pouvant être produite par le positionneur, qui a été nommée la force verticale disponible, varie d'une valeur maximale de 23 755 à une valeur de 19 725 N au point le plus bas. Ceci correspond, en kg, à une variation de 2 422 à 2 011 kg. La plate-forme élévatrice présente une masse de 1 336 kg (avec le travailleur et ses outils), et la force requise pour la soulever d'un seul côté est essentiellement la moitié de cette masse, soit 668 kg.

La position exacte des poteaux dans la fosse n'est pas connue, mais il est raisonnable de supposer qu'ils étaient situés approximativement au centre dans le sens de la largeur. La force verticale F_3 produite pour soulever la masse à cet endroit (près du grand côté opposé, à gauche sur l'image) est donc d'amplitude similaire à la force imposée à l'emplacement du support du positionneur (F_1) puisque les bras de levier sont similaires de part et d'autre du support central (F_2). La force requise en F_1 pour soulever la plate-forme d'un seul côté est donc de l'ordre de 668 kg.

On constate donc que la force verticale disponible au point où est identifiée la force F1 (2422 à 2011 kg) est amplement suffisante à contrebalancer et excéder la masse de la plate-forme élévatrice, provoquer son inclinaison et son renversement.

Par ailleurs, en mesurant sur la figure 7 la hauteur atteinte par le grand côté de la plaque qui se soulève (celui situé à gauche sur l'image), et en appliquant un facteur d'échelle avec la largeur connue de la plaque (66 pouces) qui est observable avec très peu de déformation sur la figure 7, on peut évaluer que la hauteur atteinte par le grand côté de la plaque est de l'ordre de 35 cm (13.8 pouces). Considérant cette valeur, on peut conclure que cette hauteur est suffisante pour provoquer le basculement et la chute de la plate-forme, puisque cette valeur est supérieure à la hauteur maximum d'équilibre calculée ci-dessus, et qui est $h = 23.5 \text{ cm} = 9.2 \text{ po}$.

Bilan des énergies

Le bilan des différentes énergies impliquées dans le système nous fournit également des éléments d'interprétation.

La considération de l'énergie que peut fournir le positionneur constitue une limite supérieure au niveau d'énergie disponible dans le système. L'intervalle considéré est celui contenu entre le moment où le positionneur touche la plaque d'acier et celui où il atteint son point le plus bas, balayant un angle de 16 degrés (0.280 radians). Pendant cet intervalle, l'énergie que peut fournir le positionneur est

$$E = C \theta = 45\,200 \text{ Nm} \times 0.280 \text{ rad} = 12\,647 \text{ J}$$

Appliquant ici encore l'hypothèse conservatrice selon laquelle la plaque se déformerait sur toute sa largeur selon la déflexion maximale, l'énergie requise pour déformer la plaque peut être exprimée par l'équation suivante, valide lorsque la relation entre la déflexion et la force appliquée est linéaire, ce qui est le cas ici :

$$E = F/2 \times d = 4991 \text{ N} / 2 \times 0.0889 \text{ m} = 222 \text{ J}$$

On constate que l'énergie requise pour déformer la plaque est faible comparée à l'énergie que peut fournir le positionneur.

L'énergie requise pour soulever la plate-forme élévatrice de masse $m = 1246 \text{ kg}$ et la faire passer au-delà du point de stabilité correspond à l'augmentation de l'énergie potentielle requise pour l'élévation de son centre de masse d'une hauteur h et s'exprime par

$$E = mgh$$

La distance reliant le point A et le centre de masse sur la figure 1 est de 1.228 m. La hauteur h est donc

$$h = 1.228 \text{ m} - 1.168 \text{ m} = 0.06 \text{ m}$$

et l'énergie est $E = mgh = 1246 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.06 \text{ m} = 733 \text{ J}$.

On constate que l'énergie requise pour soulever la machine et la faire basculer est faible comparée à l'énergie que peut fournir le positionneur. La somme de l'énergie requise pour soulever la machine et celle requise pour déformer la plaque, $733 \text{ J} + 222 \text{ J} = 955 \text{ J}$ est bien en deçà de l'énergie disponible de $12\,647 \text{ J}$.

Ceci nous permet de conclure que le travail consistant à la déformation de la plaque, qui a ensuite agi comme levier soulevant un côté de la machine et provoquant son renversement, constituait une faible fraction (environ 8%) de l'énergie pouvant être produite par le positionneur. Celui-ci n'a donc rencontré qu'une très faible résistance, et son mouvement n'en fut pas influencé. Le soulèvement de la plaque a vraisemblablement dû se produire tel qu'il peut être observé sur la vidéo de la simulation. Ce soulèvement, qui dure une vingtaine de secondes sur la vidéo, s'est produit lentement.

Le temps de 20 secondes correspond à une élévation de 35 cm, alors que la hauteur critique de renversement est de 23.5 cm. On peut donc supposer que le temps entre le début de l'élévation et le renversement, lors de l'accident, fut plutôt de l'ordre de 13 ou 14 secondes.

Le mouvement fut probablement difficile à percevoir pendant une fraction significative des 13 ou 14 secondes qu'il dura.

Conclusion

Les éléments techniques abordés dans cette analyse ont permis d'étudier les forces en présence et la séquence de transfert d'énergie du système constitué du positionneur, de la plaque d'acier et de la plate-forme élévatrice.

Au terme de cette étude, il apparaît que le positionneur, dans les conditions qui prévalaient lors de l'accident, présentait un couple disponible permettant de conférer au support fixé au positionneur une trajectoire et une force suffisante pour :

- imposer à la plaque d'acier une force verticale causant sa déflexion suivant le mouvement circulaire du support fixé au positionneur;
- imposer à la plaque d'acier une force suffisante pour causer sa rotation sur le pivot constitué des poteaux présents sous la plaque dans la fosse, et ainsi soulever la ou les roues de la plate-forme élévatrice positionnées sur la plaque;
- élever cette ou ces roues à une position telle que le centre de masse de la machine excéda la position de stabilité et provoqua le renversement de la machine.

Considérant que la vitesse de rotation lors de l'accident était d'une intensité équivalente à celle de la vidéo de simulation, on peut supposer que le temps entre le début de l'élévation et le renversement fut de l'ordre de 13 ou 14 secondes.



Jean Ruel, ing. Ph.D., le 17 juin 2020

No. OIQ : 106 900

Références

[1] Manuel de l'opérateur de la plate-forme élévatrice Genie GS-1930 et autres, avec consignes d'entretien, sixième édition, neuvième impression, Part No. T107026FR, Terex Corporation 1997, 2014.

[2] Aronson Gear Driven Positioners, Bulletin GP 81.

[3] Aronson HD 160 to HD 700 Gear Driven Positioner Specifications, document HD 160 to HD 700 Gear Driven Positioner.PDF.

[4] Koike Aronson Ransome, Positioners, document POSITIONER_POS_ENG_WEB.PDF.

[5] Shigley's Mechanical Engineering Design Eleventh Edition. R.G. Budynas and J.K. Nisbett, McGraw-Hill, 2020.

[6] Machinery's Handbook, 26e edition. Industrial Press, New York, 2000.

ANNEXE D**Références bibliographiques**

ARONSON MACHINE. *Gear driven positioners : available in load capacities from 250 lbs. to 4 million lbs (113 kg to 1.8 million kg)*, [En ligne], New York, Aronson Machine, [1983?]. [12] p. (Bulletin GP 81). [<https://www.sterlingmachinery.com/media/brochures1/file/Aronson-Gear-Driven-Positioners-Brochure.pdf>] (Consulté le 22 juin 2020)

KOIKE ARONSON. *HD160 to HD700 gear driven positioner specifications*, [Arcade, N.Y.], Koike Aronson, [s.d.], [2] p.

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. *Plates-formes de travail élévatrices automotrices*, 2^e éd., Toronto, CSA, 2002, vii, 29 p. (CSA B354.2-01).

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. *Plates-formes élévatrices mobiles de personnel : formation des opérateurs (conducteurs)*, 2^e éd., Toronto, CSA, 2017, 14, v, 13 p. (CAN/CSA B354.8 :17).

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. *Mobile elevating work platforms : safety principles, inspection, maintenance and operation*, 2nd ed., Toronto, CSA, 2017, 6, v, 44 p. (CSA B354.7:17).

KOIKE ARONSON RANSOME. *Positioners : tilt, turn and rotate welding positionners*, [En ligne], Arcade, N.Y., Koike Aronson, [s.d.], 42 p. [https://www.koike.com/documents/Product-Brochures/Welding/POSITIONER_POS_ENG_WEB.pdf] (Consulté le 25 juin 2020).

GENIE. *Manuel de l'opérateur*, [En ligne], 6e éd., [Redmond, Wash.], Genie, 2014, 82 p. (Part no. T107026FR). [<http://manuals.gogenielift.com/operators/french/T107026FR.pdf>] (Consulté le 25 juin 2020).

QUÉBEC. *Loi sur la santé et la sécurité du travail, chapitre S-2.1, à jour au 1^{er} mars 2020*, [En ligne], [Québec], Éditeur officiel du Québec, 2020, vii, 65, xii p. [<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/S-2.1>] (Consulté le 25 juin 2020).