

RAPPORT D'ENQUÊTE

**Accident ayant causé la mort du directeur du
laboratoire de l'entreprise Polymer Source inc.,
survenu le 22 juillet 2022 à Dorval**

Version dépersonnalisée

Service de la prévention-inspection de Montréal – Établissements 3

Inspecteur :

François Deschênes

Inspecteur :

Sébastien Petibois-Paillé

Date du rapport : 3 avril 2023

Rapport distribué à :

- Madame Neelima Varshney, directrice générale
 - Maître Steeve Poisson, coroner
 - Docteure Mylène Drouin, directrice de la santé publique de Montréal
-

TABLE DES MATIÈRES

<u>1</u>	<u>RÉSUMÉ DU RAPPORT</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>ORGANISATION DU TRAVAIL</u>	<u>3</u>
2.1	STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'ÉTABLISSEMENT	3
2.2	ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	4
2.2.1	MÉCANISMES DE PARTICIPATION	4
2.2.2	GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	4
<u>3</u>	<u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	<u>5</u>
3.1	DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	5
3.2	DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	6
<u>4</u>	<u>ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u>	<u>8</u>
4.1	CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	8
4.2	CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	9
4.2.1	SYNTHÈSE DU 1,2 DIBROMOÉTHANE- <i>D</i> ₄	9
4.2.2	MONTAGES EXPÉRIMENTAUX	10
4.2.3	AMPLEUR DES DÉGÂTS CAUSÉS PAR L'EXPLOSION	12
4.2.4	ACÉTYLÈNE	14
4.2.4.1	Caractéristiques	14
4.2.4.2	Stockage	15
4.2.4.3	Pression interne du cylindre	16
4.2.5	ANALYSE DES RISQUES	17
4.2.6	ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELS	17
4.2.7	EXIGENCES LÉGALES, RÉGLEMENTAIRES ET NORMATIVES	18
4.3	ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES	19
4.3.1	LORS DE LA RÉACTION DE SYNTHÈSE DU 1,2 DIBROMOÉTHANE- <i>D</i> ₄ , LA DÉCOMPOSITION DE L'ACÉTYLÈNE- <i>D</i> ₂ CONTENU DANS UN CYLINDRE PROVOQUE UNE EXPLOSION ET CAUSE DES BLESSURES MORTELLES AU DIRECTEUR DU LABORATOIRE	19
4.3.2	LA MÉTHODE DE DÉGEL DU CYLINDRE D'ACÉTYLÈNE EXPOSE LE DIRECTEUR DU LABORATOIRE À UN DANGER D'EXPLOSION	19
4.3.3	L'IDENTIFICATION DÉFICIENTE DES RISQUES AVANT D'ENTREPRENDRE LA RÉACTION DE SYNTHÈSE ENTRAÎNE LA MANIPULATION D'ACÉTYLÈNE DANS DES CONDITIONS DANGEREUSES	20

5	<u>CONCLUSION</u>	23
	5.1 CAUSES DE L'ACCIDENT	23
	5.2 AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE	23
	5.3 SUIVIS DE L'ENQUÊTE	23
	<u>ANNEXES</u>	
	ANNEXE A : Accidenté	24
	ANNEXE B : Liste des personnes interrogées	25
	ANNEXE C : Calculs	26
	ANNEXE D : Références bibliographiques	28

SECTION 1

1 RÉSUMÉ DU RAPPORT

Description de l'accident

Le 22 juillet 2022, vers 10 h, le directeur du laboratoire poursuit la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 qu'il avait commencé la veille. Ce produit est un monomère qui servira au développement de nouveaux polymères. Il est généré par la réaction chimique entre de l'acétylène- d_2 , un gaz extrêmement inflammable, et du bromure de deutérium. Vers 11 h 30, le cylindre contenant l'acétylène explose.

Conséquences

L'explosion cause de graves blessures au directeur du laboratoire. Il en décède quelques minutes plus tard.

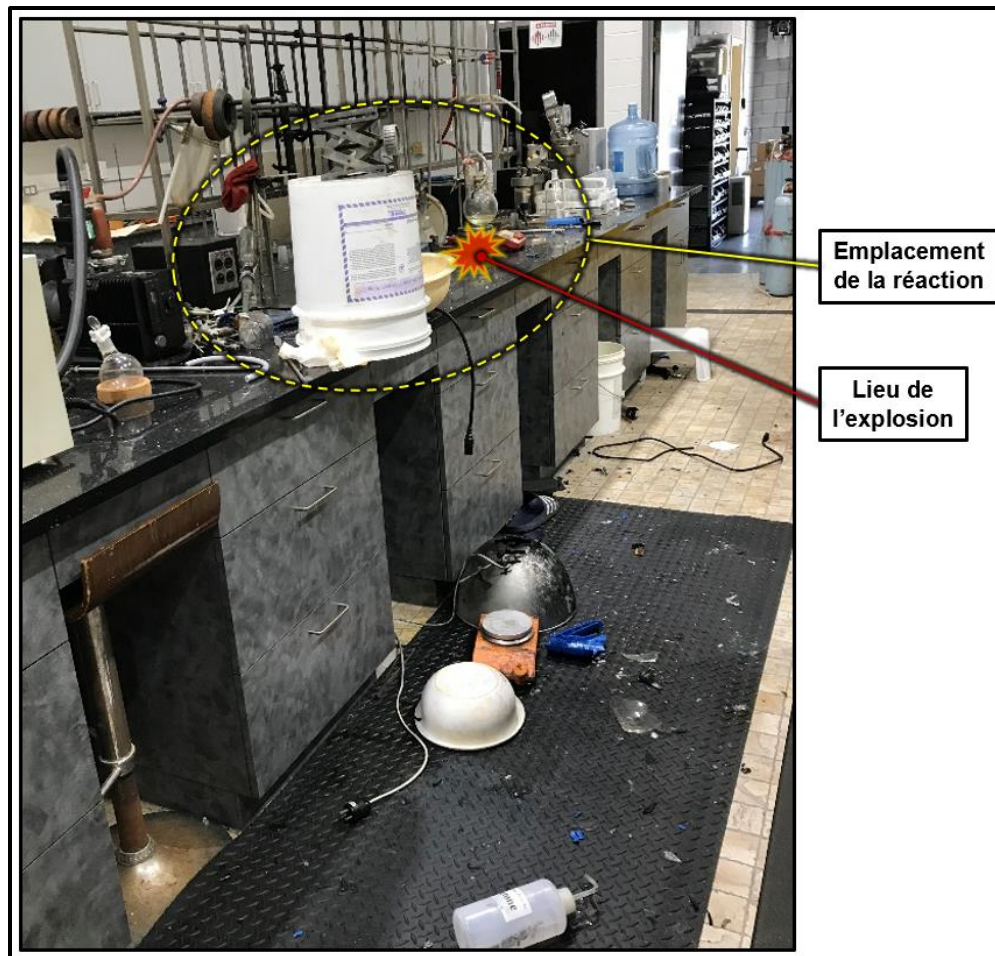


Figure 1 - État des lieux à la suite de l'explosion à l'emplacement où se déroulait la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4

(Source : CNESST)

Abrégé des causes

- 1- Lors de la réaction de synthèse du 1,2 dibromoéthane- d_4 , la décomposition de l'acétylène- d_2 contenu dans un cylindre provoque une explosion et cause des blessures mortelles au directeur du laboratoire.
- 2- La méthode de dégel du cylindre d'acétylène expose le directeur du laboratoire à un danger d'explosion.
- 3- L'identification déficiente des risques avant d'entreprendre la réaction de synthèse entraîne la manipulation d'acétylène dans des conditions dangereuses.

Mesures correctives

Le 22 juillet 2022, dans le rapport d'intervention RAP9142878, la CNESST interdit l'accès au laboratoire aux fins d'enquête.

Le 2 août 2022, dans le rapport d'intervention RAP1394366, la CNESST autorise l'accès au laboratoire et permet la modification des lieux. De plus, elle rend trois nouvelles décisions : l'interdiction de travaux de synthèse de 1,2-dibromoéthane- d_4 , de fabrication d'acétylène et d'utilisation des pistolets thermiques dans le laboratoire.

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

SECTION 2

2 ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1 Structure générale de l'établissement

L'entreprise Polymer Source inc. se spécialise dans la recherche et développement, la production et la vente de polymères. Elle emploie environ travailleurs non syndiqués qui travaillent sur un seul quart de travail dont l'horaire est variable.

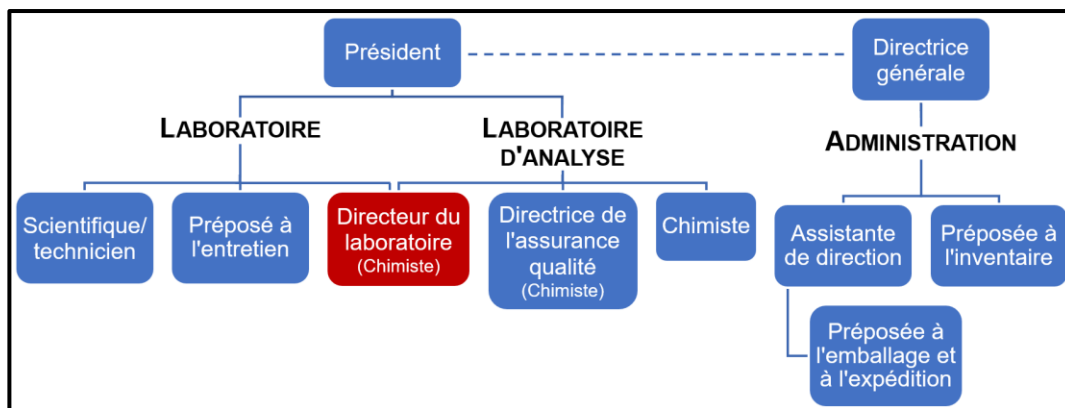


Fig. 2 - Organigramme de l'entreprise Polymer Source inc.

(Source : CNESST)

Le président est responsable du laboratoire principal et du laboratoire d'analyse. Il y coordonne les activités et l'ensemble des travailleurs des laboratoires se rapporte directement à lui. Il est également chargé des communications et des demandes des clients.

Au laboratoire principal, où est survenu l'accident, le directeur du laboratoire est responsable de la recherche et du développement de nouveaux polymères et assure le bon fonctionnement général du laboratoire. Il y a également un scientifique/technicien qui fabrique des polymères selon des protocoles de laboratoire établis. Enfin, il y a un préposé à l'entretien qui est responsable de la propreté du laboratoire, du nettoyage et du rangement de la verrerie ainsi que de la réception et l'entreposage des matières premières.

Le laboratoire d'analyse est distinct du laboratoire principal. Il occupe deux locaux au rez-de-chaussée et un local à l'étage. La directrice de l'assurance qualité est chargée notamment du contrôle de la qualité, du bon entreposage des produits chimiques ainsi que de la mise en place et de l'application des règles exigées pour la certification ISO 9001:2015.

La directrice générale est quant à elle responsable de l'administration. Ce département inclut la comptabilité, le service à la clientèle, ainsi que l'inventaire, l'emballage et l'expédition des produits.

2.2 Organisation de la santé et de la sécurité du travail

2.2.1 Mécanismes de participation

L'entreprise ne dispose pas d'un comité de santé et de sécurité. Il n'y a pas de mécanisme formel favorisant la participation des travailleurs à la santé et la sécurité du travail. En cas de problème, les travailleurs doivent se référer à l'employeur.

2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

L'établissement ne possède pas de programme de prévention. Il y a uniquement un plan de sécurité en cas incendie.

Polymer Source inc. est certifiée ISO 9001:2015, une norme internationale concernant les systèmes de gestion de la qualité. La portée de la certification concerne la recherche et développement, la production, la vente et la distribution en lien avec les polymères et la chimie organique. Elle vise également la caractérisation de polymères et l'analyse de données.

L'entreprise possède quelques procédures opérationnelles normalisées (« standard operating procedures » [SOPs]), mais qui ne sont plus en vigueur. Dans ces procédures, il y avait entre autres des instructions de travail sur des techniques spécifiques et une procédure concernant la sécurité au laboratoire.

Aucun mécanisme formel d'inspection des lieux de travail n'est appliqué.

SECTION 3

3 DESCRIPTION DU TRAVAIL

3.1 Description du lieu de travail

L'entreprise Polymer Source inc. est située au 124, rue Avro, à Dorval. Le bâtiment occupe une superficie d'environ 1 132 m² répartie sur deux étages.



Fig. 3 - Vue aérienne de l'établissement de Polymer Source inc., situé au 124, rue Avro, à Dorval (Source : Google Earth)

Le rez-de-chaussée comprend des bureaux administratifs, un laboratoire principal, une laverie, deux laboratoires d'analyse, des locaux d'entreposage pour les produits chimiques et un entrepôt de matériel (voir figure 4).

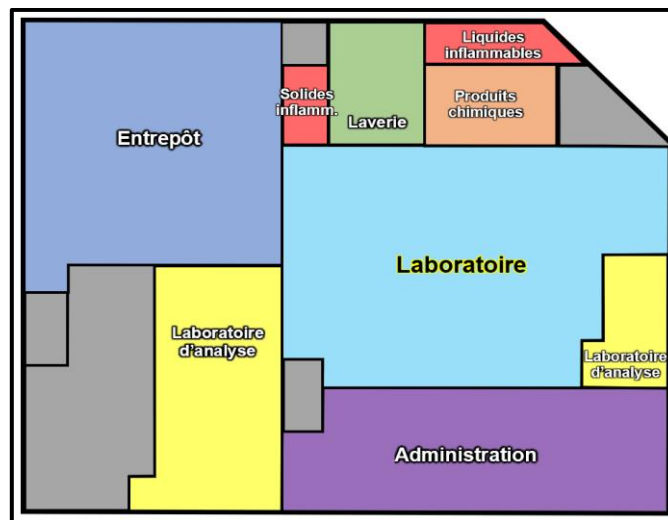


Fig. 4 - Plan du rez-de-chaussée de l'établissement de Polymer Source inc. (Source : CNESST)

Le laboratoire principal sert à la recherche et au développement, à la synthèse et à la purification de polymères. Il est aménagé de trois comptoirs principaux : le comptoir n° 1 est le poste de travail du directeur du laboratoire et le comptoir n° 2 est celui du scientifique/technicien de laboratoire. Au moment de l'explosion, la réaction de synthèse se déroulait au comptoir n° 3 (voir figure 5). Ce comptoir n'est pas dédié à un travailleur, mais est utilisé selon les besoins opérationnels. Deux sections de murets en béton sont construites entre chaque station. Des sections de comptoir sont aménagées de chaque côté de ces murets.

Des systèmes de ventilation locale par aspiration sont installés au-dessus des comptoirs principaux et des deux distillateurs. Il y a également trois hottes chimiques au fond du laboratoire. Enfin, un poste de pesée est aménagé près de l'entrée du laboratoire.

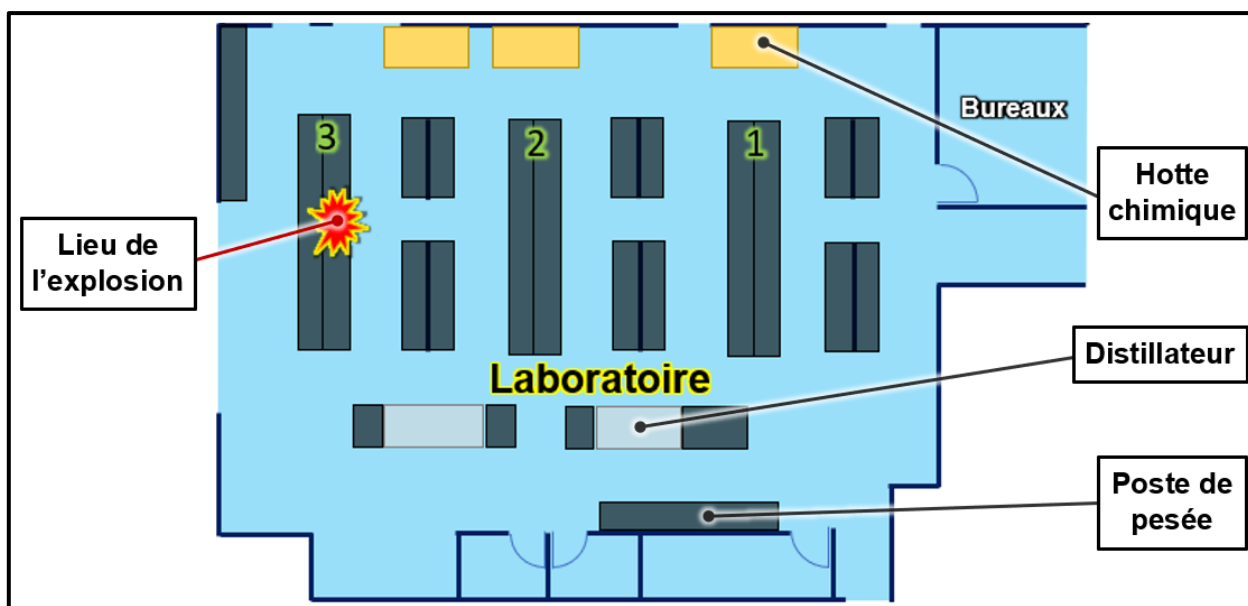


Fig. 5 - Plan du laboratoire principal de Polymer Source inc.
(Source : CNESST)

3.2 Description du travail à effectuer

Une des fonctions qui est attribuée au directeur du laboratoire est la recherche et le développement de monomères et de polymères. Il effectue des recherches dans la littérature scientifique et réalise des essais de synthèse en se basant sur des protocoles scientifiques. Il optimise ensuite ces protocoles afin d'améliorer la qualité et le rendement du produit synthétisé.

À la suite de recherches dans la littérature, le directeur du laboratoire a identifié une molécule d'intérêt qui servira au développement de nouveaux polymères. Il s'agit du 1,2-dibromoéthane- d_4 . Entre les mois de mai et juillet 2022, il réalise plusieurs essais de synthèse de ce produit. Au fil de ses expérimentations, il effectue différents ajustements afin d'améliorer le rendement du produit final obtenu.

Le matin de l'accident, le directeur du laboratoire poursuivait une réaction de synthèse de 1,2-dibromoéthane- d_4 commencée la veille (voir figure 6).

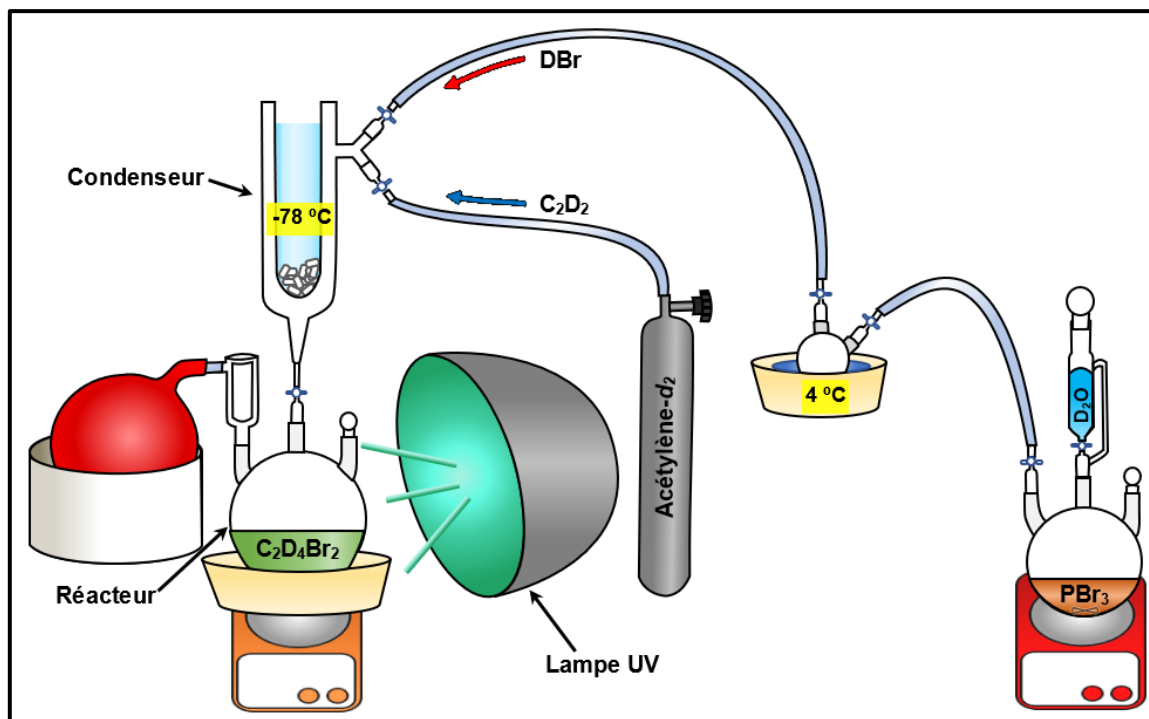


Fig. 6 - Représentation du montage de la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane-d₄ (C₂D₄Br₂) à partir de bromure de deutérium (DBr) et d'acétylène-d₂ (C₂D₂) réalisé la veille de l'accident
(Source : CNESST)

SECTION 4

4 ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE

4.1 Chronologie de l'accident

Des caméras de surveillance sont présentes sur les lieux. Les enregistrements obtenus ont permis de visionner certaines séquences qui ont aidé à reconstituer la chronologie des événements ainsi que le montage expérimental.

Le 21 juillet 2022, soit la veille de l'accident, le directeur du laboratoire effectue la synthèse d'acétylène- d_2 dans le laboratoire au poste de travail n° 1 et l'emmagasine dans un cylindre en acier inoxydable. L'acétylène- d_2 est un des réactifs nécessaires pour la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 .

Vers 16 h, il commence l'installation du montage pour la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 au poste de travail n° 3. Vers 17 h 15, il démarre la réaction de synthèse. Il effectue ensuite des ajustements au montage : il ajoute de l'azote liquide dans le condenseur puis de la glace sèche dans le bol situé sous le réacteur et ajuste à plusieurs reprises le débit à la sortie du cylindre d'acétylène- d_2 , en observant le gonflement du ballon en caoutchouc.

À 17 h 51, il immerge le cylindre d'acétylène- d_2 dans l'azote liquide. À 18 h, il débranche le cylindre du montage et le retire de l'azote liquide. Il va le peser au poste de pesée et le remet ensuite en place dans le montage puis le replonge dans l'azote liquide. À 18 h 04, il retire le cylindre de l'azote liquide et poursuit la réaction. À 18 h 08, il décroche le cylindre glacé et le rince à l'eau du robinet pendant environ 1 minute. Il le réinstalle ensuite au montage et ajuste le débit du cylindre pour finalement réussir à faire gonfler le ballon en caoutchouc. À 18 h 30, il immerge à nouveau le cylindre dans l'azote liquide.

Vers 18 h 35, il ferme les valves, débranche les tuyaux, sort le cylindre de l'azote liquide et interrompt ainsi la réaction de synthèse. Il récupère le produit synthétisé dans un ballon de verre puis discute avec le président pendant quelques minutes. Il met ensuite le ballon au réfrigérateur et quitte le lieu de travail.

Le lendemain, vers 10 h, le directeur du laboratoire retourne au poste de travail n° 3 pour poursuivre la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 . Il remet le produit obtenu la veille dans le réacteur et redémarre la réaction. Il ajoute de la glace sèche (dioxyde de carbone solidifié) et de l'acétone dans le condenseur au-dessus du réacteur.

À 10 h 53, il immerge le cylindre d'acétylène- d_2 dans l'azote liquide. Il ajuste la valve du cylindre. À 10 h 56, il ajoute de la glace sèche dans le bol du réacteur. Le ballon en caoutchouc rétrécit. Il remet de la glace sèche dans le condenseur. À 11 h, il ferme la valve du cylindre et retire ce dernier de l'azote liquide. Quelques minutes plus tard, il immerge de nouveau le cylindre dans l'azote liquide.

À 11 h 14, le cylindre est toujours dans l'azote liquide. Entre 11 h 15 et 11 h 30, le directeur du laboratoire ressort le cylindre de l'azote liquide et le laisse à température ambiante. Les caméras

de surveillance n'ont pas capté la période entre 11 h 15 et 11 h 30 et aucun témoin n'a vu les actions posées par le directeur du laboratoire juste avant l'explosion.

Vers 11 h 30, une explosion survient au poste de travail n° 3 provoquant un bruit assourdissant. Le directeur du laboratoire, le président, le technicien/scientifique et le préposé à l'entretien sont présents à ce moment dans le laboratoire. Le directeur du laboratoire s'effondre dans la voie de circulation entre les postes de travail n° 2 et n° 3. Il subit des blessures importantes à l'abdomen et à la main droite. [REDACTED] lui prodigue les premiers soins et les services d'urgence sont appelés.

Les pompiers accèdent au laboratoire et transfèrent la victime à l'extérieur de l'établissement pour continuer les premiers secours. Vers 12 h, les manœuvres de réanimation sont arrêtées et le décès du directeur du laboratoire est constaté sur place.

4.2 Constatations et informations recueillies

4.2.1 Synthèse du 1,2 dibromoéthane- d_4

La réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 est basée sur l'article scientifique *Synthesis Of Organic Deuterium Compounds : III. 1,2-Dibromoethane- D_4 And Its Derivatives*, de L. C. Leitch and A. T. Morse, paru dans le Canadian Journal of Chemistry en décembre 1952. Il s'agit d'une réaction gazeuse entre des molécules d'acétylène deutéré (acétylène- d_2) et de bromure de deutérium (DBr).

Synthèse d'acétylène- d_2 :

L'acétylène- d_2 peut être acheté auprès d'un fournisseur de gaz comprimé. Comme son coût d'achat est élevé, l'entreprise le synthétise elle-même dans le laboratoire à partir de carbure de calcium (CaC_2) auquel est ajoutée de l'eau deutérée (D_2O).

L'article scientifique décrit le protocole de la réaction de synthèse du premier réactif, l'acétylène- d_2 , à partir de 75 g de carbure de calcium broyé (CaC_2) auquel on ajoute graduellement de l'eau deutérée (D_2O). L'acétylène- d_2 gazeux généré traverse successivement un condenseur à -40°C puis trois ballons de rinçage d'acide sulfurique (H_2SO_4) afin de retirer les impuretés. Un manomètre de mercure est présent afin de mesurer la pression des gaz lors de la réaction. L'acétylène- d_2 est alors solidifié dans un condenseur refroidi dans l'azote liquide à -196°C . En retirant ensuite l'azote liquide, l'acétylène- d_2 se sublime en gaz et est recueilli dans un contenant pour les gaz d'une capacité de 8 L.

Synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 :

La réaction de synthèse du second réactif, le bromure de deutérium (DBr), et la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 sont effectuées simultanément, c'est-à-dire dans un seul et même montage. Le DBr, un gaz corrosif ininflammable, est produit par l'ajout graduel de D_2O à du tribromure de phosphore (PBr_3), un liquide corrosif ininflammable. Le DBr gazeux passe ensuite dans un condenseur à -40°C afin de retirer toute trace de PBr_3 . Par la suite, le DBr, dont le point d'ébullition est à $-66,1^\circ\text{C}$, est liquéfié dans un condenseur à -78°C .

Lorsqu'un certain volume de DBr liquide est recueilli, il est ramené sous forme gazeuse à une certaine pression, mesurée à l'aide d'un manomètre de mercure. Il sert alors de réactif de départ

pour la réaction de synthèse de 1,2-dibromoéthane- d_4 , auquel on ajoute l'autre réactif préalablement synthétisé, l'acétylène- d_2 . Le DBr et l'acétylène- d_2 sont introduits dans le réacteur à une certaine pression et dans une proportion 2 : 1. La réaction entre le DBr et l'acétylène- d_2 , exposés aux rayons ultraviolets, forment ainsi du 1,2-dibromoéthane- d_4 sous forme liquide.

4.2.2 Montages expérimentaux

Synthèse d'acétylène- d_2 :

Avant de commencer la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 , le directeur du laboratoire a effectué la réaction de synthèse de l'acétylène- d_2 au poste de travail n° 1. Le montage pour cette réaction est représenté à la figure 7. Contrairement au protocole de l'article scientifique, il n'y a pas de manomètre de mercure ni d'autres appareils équivalents qui ont été utilisés pour mesurer la pression.

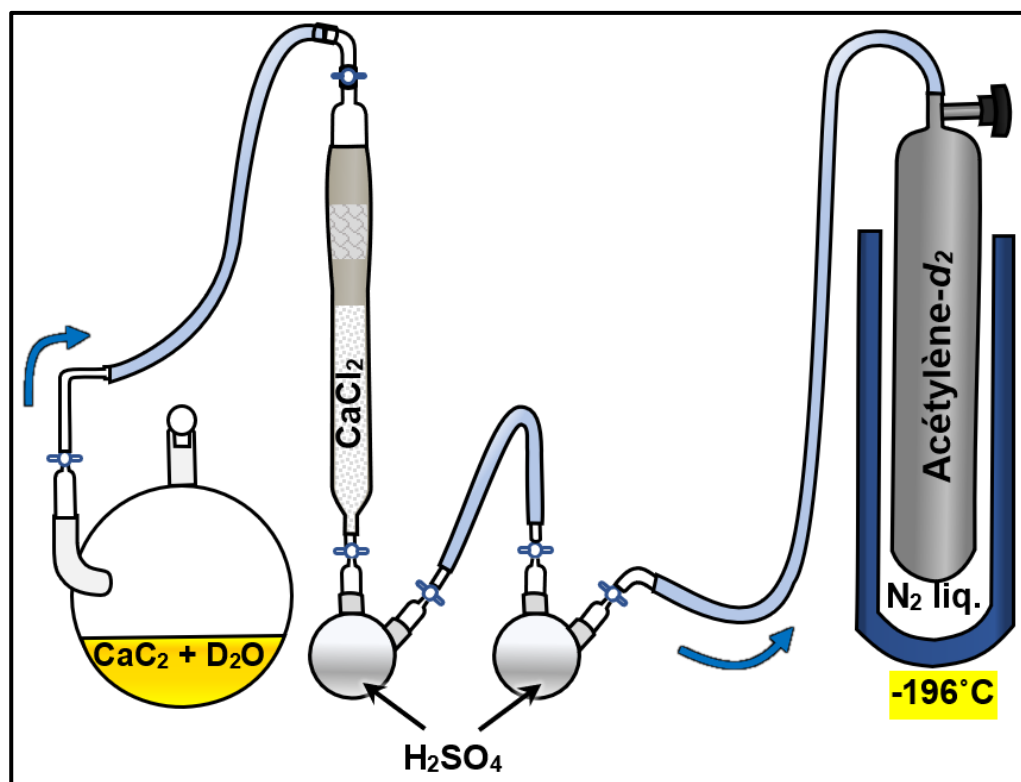
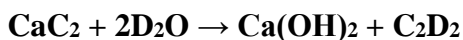


Fig. 7 - Représentation du montage de la réaction de synthèse de l'acétylène- d_2 à partir de carbure de calcium (CaC_2) et d'eau deutérée (D_2O)
(Source : CNESST)

La synthèse d'acétylène- d_2 (C_2D_2) est effectuée selon la réaction chimique décrite ci-dessous à partir de carbure de calcium (CaC_2) et d'eau deutérée (D_2O).



Au cours des différents essais réalisés entre les mois de mai et de juillet 2022, le directeur du laboratoire fait varier les quantités des réactifs utilisés. Pour réaliser l'expérimentation qui conduira à cet accident, il utilise 103 g de carbure de calcium. Il s'agit de la plus grande quantité utilisée depuis le début des essais. De plus, cette quantité est supérieure à la quantité de 75 g

décrite dans l'article scientifique. En considérant que tout le réactif a réagi, ceci aurait généré théoriquement 45 g d'acétylène- d_2 (voir calcul 1 à l'annexe C).

Le directeur a pesé le cylindre après l'avoir rempli d'acétylène- d_2 . D'après une feuille de calculs récupérée sur son bureau, la masse d'acétylène- d_2 recueillie était d'environ 60 g. C'est d'ailleurs à partir de ces données que le directeur du laboratoire a basé ses autres calculs pour déterminer les quantités de réactifs de départ nécessaires pour la réaction de synthèse du DBr (voir calculs 2 à 4 à l'annexe C).

Synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 :

La veille de l'accident, le directeur du laboratoire a préparé au poste de travail n° 3 le montage pour la réaction de synthèse de 1,2-dibromoéthane- d_4 ($C_2D_4Br_2$). En cours de réaction, le directeur apporte des ajustements au montage. Il abaisse les températures de l'acétylène- d_2 et du réacteur en les plongeant respectivement dans de l'azote liquide et de la glace sèche. Le montage à la suite de ces ajustements est représenté à la figure 8.

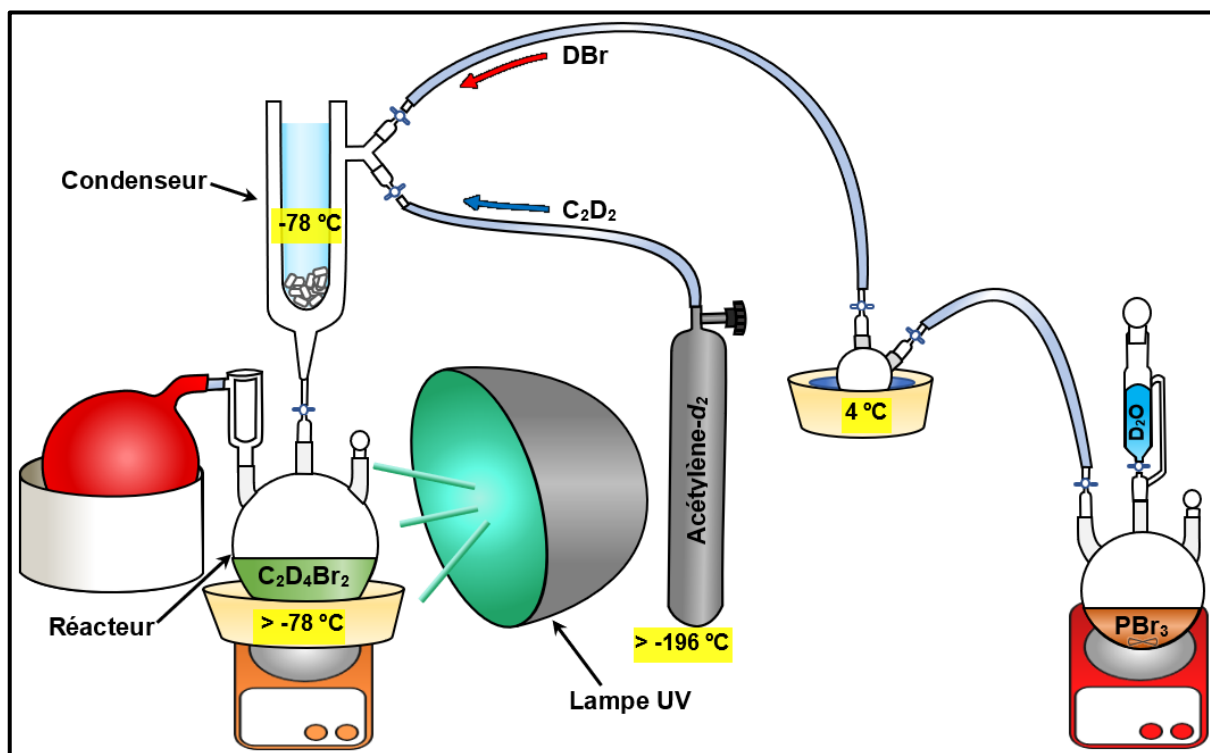


Fig. 8 - Représentation du montage de la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 ($C_2D_4Br_2$) à partir de bromure de deutérium (DBr) et d'acétylène- d_2 (C_2D_2) avec les derniers ajustements des températures avant l'accident
(Source : CNESST)

Outre ces modifications, le directeur du laboratoire adapte également certains équipements et méthodes du protocole de l'article scientifique. Par exemple, les manomètres de mercure, utilisés afin de mesurer la pression du bromure de deutérium et de l'acétylène- d_2 , ont été remplacés par un ballon en caoutchouc installé au-dessus du réacteur. Ce ballon sert d'indicateur visuel de la présence de gaz dans le réacteur.

4.2.3 Ampleur des dégâts causés par l'explosion

À la suite de l'explosion du cylindre d'acétylène- d_2 , des éléments du montage au poste de travail n° 3 ont été endommagés ou projetés. Des pièces de verrerie, le réacteur ainsi que le condenseur ont été brisés en fragments de petites et grandes dimensions. Des débris de l'explosion ont été projetés vers le directeur du laboratoire, vers le côté gauche du poste de travail ainsi que vers l'arrière du montage, causant le bris d'une porte vitrée. La lampe à rayons ultraviolets et la plaque agitatrice sous le réacteur ont été projetées au sol. L'intérieur de la lampe UV est demeuré intact tandis que sa surface externe présente des marques d'impact de fragments projetés par l'explosion et est couverte de suie noire.

L'explosion a laissé des traces de suie noire principalement du côté gauche de la table de travail ainsi que sur les pinces de laboratoire et supports verticaux aménagés au centre de la table. Le ballon contenant le tribromure de phosphore (PBr_3) est demeuré intact, mais la bassine à 4 °C sous le petit ballon s'est renversée et brisée en deux morceaux.

Le cylindre contenant l'acétylène- d_2 a explosé en quatre fragments. Trois fragments, identifiés A, B et D, ont été trouvés à différents endroits dans le laboratoire (voir figure 9). Le fragment C, d'une dimension d'environ 11 cm par 7 cm et d'un poids d'environ 100 g, a pénétré l'abdomen du directeur du laboratoire.

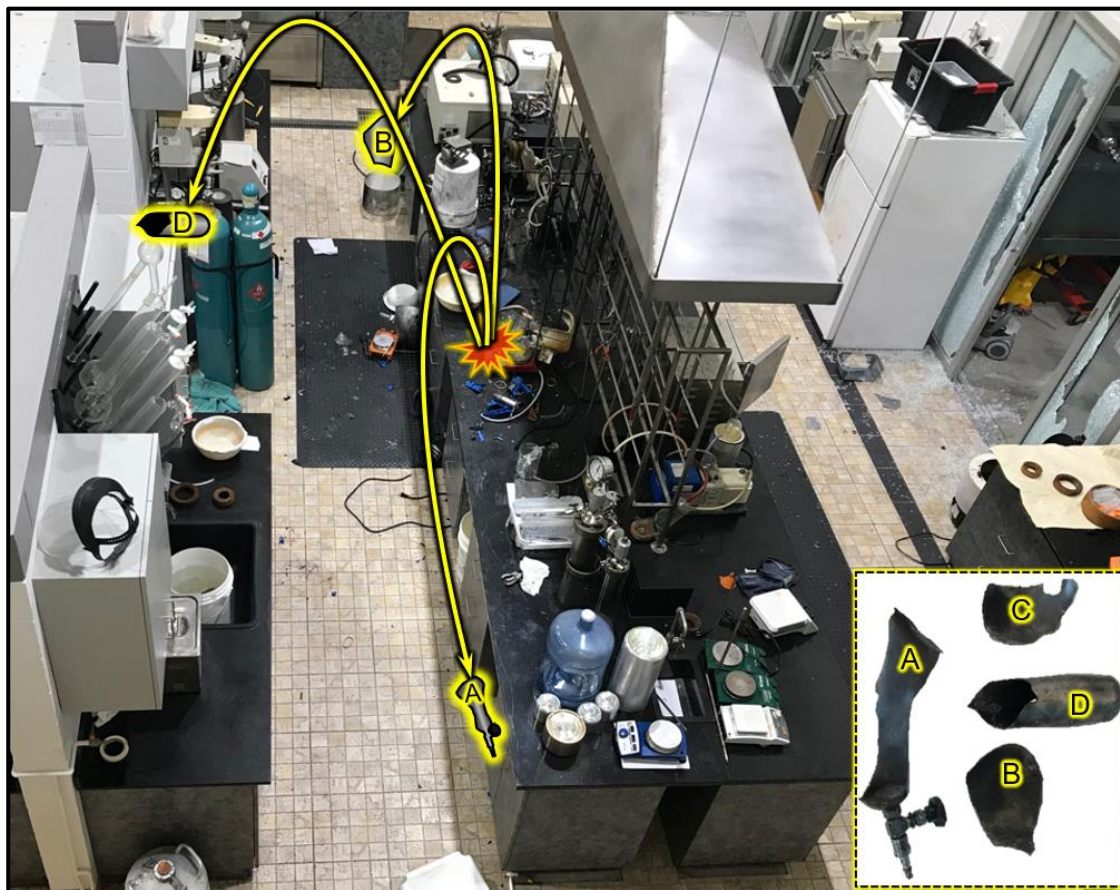


Fig. 9 - *Emplacement des fragments du cylindre d'acétylène- d_2 après l'explosion*
(Source : CNESST)

La valve du fragment A est trouvée en position fermée. Les fragments du cylindre présentent des signes de déformation marqués tels que de la torsion, du dépliement, de l'étirement ainsi que du gonflement. La reconstitution des fragments du cylindre démontre la rupture du cylindre par sa paroi latérale (voir figure 10). Il y a présence de suie noire sur les faces internes des fragments du cylindre.

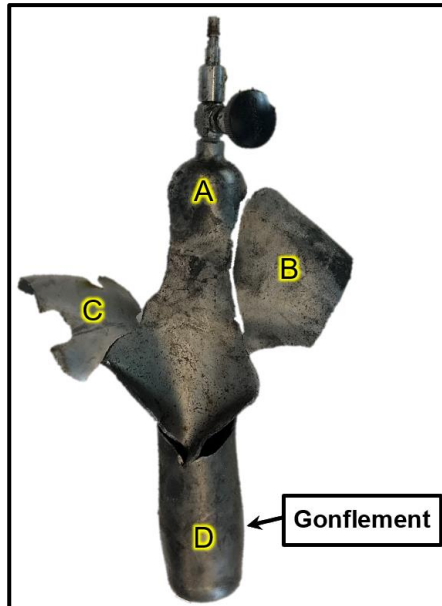


Fig. 10 - Reconstitution du cylindre d'acétylène-d₂ à partir des quatre fragments récupérés
(Source : CNESST)

Enfin, plusieurs fragments de plastique de couleur bleue, provenant d'un pistolet thermique de marque MASTERCRAFT, ont été projetés dans le laboratoire (voir figure 11) de même qu'en direction du directeur du laboratoire. Le cordon électrique du pistolet a été arraché et la fiche électrique n'est plus raccordée à une prise.

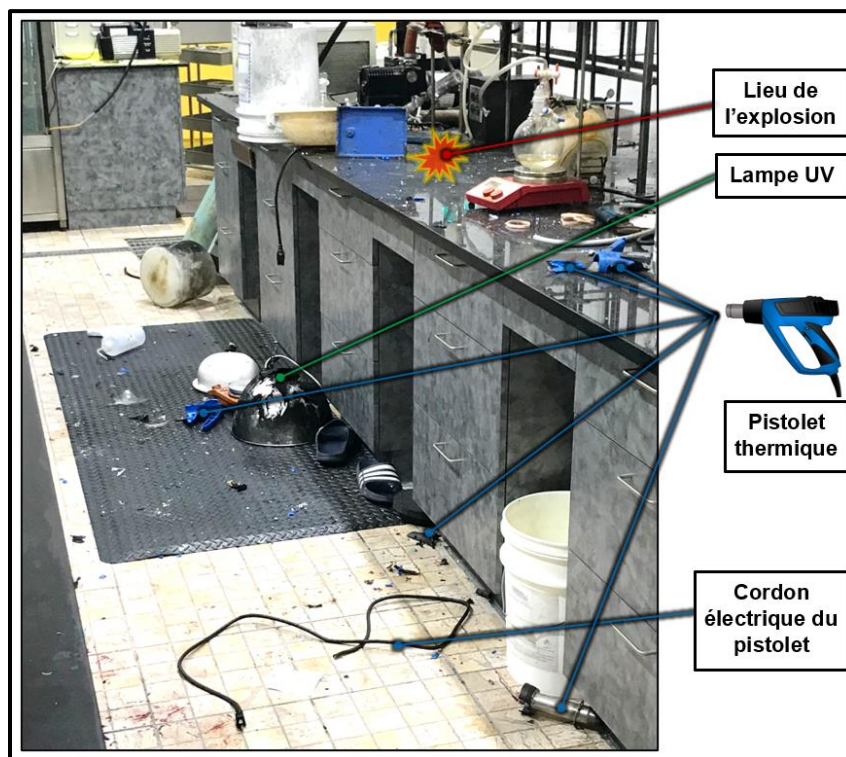


Fig. 11 - *Emplacement des composantes du pistolet thermique après l'explosion*
(Source : CNESST)

Selon la fiche technique du fournisseur du pistolet thermique, il est possible de régler le pistolet à différentes températures. Lorsque l'interrupteur est à la position zéro, le pistolet est à l'arrêt. Les positions 1, 2 et 3 correspondent respectivement à des températures de 25 °C, 350 °C et 550 °C. L'interrupteur du pistolet a été éjecté du boîtier lors de l'explosion. Des taches de sang ont été trouvées sur le chiffre 3 de l'interrupteur.

Il y a trois pistolets thermiques disponibles dans le laboratoire. Le protocole de l'article scientifique pour la synthèse de 1,2-dibromoéthane-*d*₄ ne prévoit aucune étape de chauffe.

4.2.4 Acétylène

4.2.4.1 Caractéristiques

L'acétylène est un gaz extrêmement inflammable. Lorsqu'il est mis sous pression, il peut se décomposer violemment en ses éléments (hydrogène et carbone) avec un dégagement de chaleur et mener à une explosion. La décomposition peut être initiée par un choc, une élévation brusque de température ou une réaction avec une autre substance. La présence d'oxygène n'est pas nécessaire pour amorcer ou maintenir la décomposition de l'acétylène.

L'acétylène peut être présent sous forme solide, liquide ou gazeuse, en fonction de la température et de la pression auxquelles il est soumis. L'acétylène est à l'état gazeux à température ambiante et à pression atmosphérique. À 20 °C, sa densité est de 1,0896 g/L. Son point de fusion est de -81,4 °C.

Les limites inférieures et supérieures d'explosivité de l'acétylène sont respectivement de 2,5 % et de 80 à 100 %. Son risque de décomposition explosive croît avec la pression, mais peut dépendre également d'autres paramètres tels que la température, la forme et les dimensions du récipient ainsi que la présence d'une source de chaleur et d'inflammation. La combustion de l'acétylène dans un milieu pauvre en oxygène entraîne la production de suie noire due à la combustion incomplète des molécules. L'acétylène sous forme liquide est instable et possède des propriétés explosives plus marquées que sa forme gazeuse. Sous forme solide, il est inflammable et peut aussi présenter un risque pour la sécurité.

Dans l'acétylène- d_2 , les atomes d'hydrogène ont été remplacés par du deutérium (^2H ou D). Il s'agit d'un isotope de l'hydrogène caractérisé par l'ajout d'un neutron dans le noyau, qui est composé d'un seul proton. Puisqu'il est un isotope du même atome, l'acétylène- d_2 est considéré comme ayant des propriétés physicochimiques similaires à l'acétylène non deutéré.

4.2.4.2 Stockage

Les gaz comprimés sont normalement fabriqués avec un haut degré de pureté et mis en bouteille par des fournisseurs spécialisés. Les bouteilles de gaz comprimés doivent être remplies et manutentionnées conformément aux normes et aux réglementations applicables. Puisque les contenants de gaz sont expédiés du fournisseur au client, ils doivent également être conformes à la réglementation fédérale liée au transport des marchandises dangereuses (TMD).

Avant de procéder au remplissage d'une bouteille d'acétylène, il est important de s'assurer que la bouteille est conforme aux réglementations locales pour ce produit et qu'elle est en bonne condition.

Selon la norme ISO 3807 *Bouteilles à gaz – Bouteilles d'acétylène – Exigences fondamentales et essais de type*, en raison de l'instabilité de l'acétylène, les bouteilles doivent être remplies d'une matière poreuse. Celle-ci comporte des espaces cellulaires minuscules qui préviennent la formation de poches de gaz. Elle doit avoir la capacité d'empêcher la décomposition de l'acétylène à l'intérieur de la bouteille. De plus, elle est généralement saturée d'un solvant, tel que l'acétone ou le diméthylformamide (DMF), dans lequel l'acétylène est dissout. La combinaison de ces deux mesures permet le stockage de l'acétylène dans un cylindre à une pression modérée et prévient le risque de décomposition explosive.

Des essais réalisés par le fabricant permettent de déterminer la teneur spécifiée en solvant et la teneur maximale en acétylène afin de s'assurer des conditions de remplissage sécuritaires et optimales d'une bouteille.

Il est possible de remplir des bouteilles d'acétylène sans solvant. Cependant, les bouteilles doivent tout de même être remplies d'une matière poreuse et la teneur d'acétylène ne doit pas dépasser 1/10 de la teneur maximale permise pour des bouteilles équivalentes avec solvant.

Afin de pouvoir être transporté, l'acétylène dissout doit être mis dans des bouteilles en acier fabriquées en conformité avec la norme CSA B339 *Bouteilles à gaz cylindriques et sphériques et tubes pour le transport des marchandises dangereuses*, soit des bouteilles conformes à la spécification TC-8WM, TC-8WAM, DOT-8, DOT-8AL, ou CTC-8WC.

Le contenant utilisé par le directeur du laboratoire pour le stockage de l'acétylène- d_2 est un cylindre d'échantillonnage en acier inoxydable 304L à une seule extrémité de marque SWAGELOK. Il est d'une capacité de 500 ml et est conçu pour la cueillette et le transport de matière sous forme gazeuse ou liquide. Un raccord amovible exempt d'un dispositif de surpression est installé dans l'ouverture du cylindre. Ce raccord est relié à la valve de service. Le cylindre est creux, c'est-à-dire exempt de matière poreuse et est exempt de solvant.

D'après les données techniques du fournisseur et des mesures prises sur un cylindre similaire, le cylindre utilisé était d'une longueur de 345 mm et d'un diamètre de 50,8 mm. L'épaisseur des parois était d'au moins 2,4 mm. Le cylindre était conforme aux spécifications DOT-3E 1800 et TC-3EM124. La pression de service maximale recommandée par le fournisseur est de 1 800 psi (12 410 kPa) pour des températures situées entre -53 °C et 37 °C. Le fournisseur ne recommande pas d'utiliser le produit en dehors de ces plages de pression et de température. Les cylindres sont testés à une pression hydrostatique de 3 050 psi (21 029 kPa) et un essai d'éclatement (*burst test*) est effectué sur un cylindre de chaque lot fabriqué.

Le fournisseur spécifie que lors de la sélection d'un cylindre, l'utilisateur est responsable de s'assurer notamment de la fonction, de la compatibilité des matériaux, des limites de pression et de température ainsi que de l'installation, de l'opération et de la maintenance appropriée du cylindre pour garantir la sécurité.

4.2.4.3 Pression interne du cylindre

Le fabricant d'une bouteille destinée à contenir de l'acétylène doit mettre à la disposition du remplisseur les informations relatives à la masse poreuse, le type de solvant, la tare de la bouteille, la masse totale et/ou la teneur ou la charge maximale d'acétylène ainsi que la pression maximale dans la bouteille. Selon la norme CGA G-1 : *Acetylene*, la pression maximale dans le cylindre ne doit pas dépasser 250 psi (1 720 kPa) à une température de 21,1 °C.

Pour les bouteilles sans solvant, le remplisseur doit calculer la quantité maximale d'acétylène permise en fonction de la masse volumique de l'acétylène, de la pression et du volume disponible en tenant compte de la masse poreuse. La pression ne doit pas dépasser celle prévue pour les bouteilles avec solvant.

D'après l'employeur, la pression dans le cylindre n'était pas très élevée, environ 3 à 4 psi (20,7 à 27,6 kPa). Cependant, au cours des réactions de synthèse de l'acétylène- d_2 et du 1,2-dibromoéthane- d_4 , aucun instrument n'a été utilisé pour mesurer la pression interne du cylindre ni pour connaître la pression de service.

En se basant sur la quantité de carbure de calcium (CaC_2) utilisée dans la réaction de synthèse, la quantité théorique d'acétylène- d_2 produite aurait été de 45 g (voir calcul 1 à l'annexe C). Toutefois, en pesant le cylindre, le directeur du laboratoire a obtenu une masse d'acétylène d'environ 60 g. Les calculs de volume et de pression à partir de 45 g d'acétylène sont détaillés à l'annexe C (voir calculs 5 et 6).

Le remplissage de l'acétylène- d_2 dans le cylindre aurait ainsi généré à température ambiante un volume de 41,3 L d'acétylène dans le cylindre de 500 ml. Dans le cas où l'acétylène serait présent entièrement sous forme gazeuse, la pression théorique calculée qu'il générerait dans le cylindre serait d'environ 1 138 psi (ou 7 848 kPa). Cette valeur demeure toutefois théorique, car au-delà de certaines valeurs de température et de pression, les gaz cessent de se comporter selon la loi des gaz parfaits.

4.2.5 Analyse des risques

En 2021, à la suite d'un accident de travail survenu lors d'une réaction de synthèse, l'employeur a implanté un formulaire d'analyse des risques au laboratoire pour les synthèses organiques et les synthèses de polymères. Il y est mentionné que ce document doit être rempli par un chimiste puis approuvé par le directeur du laboratoire avant le démarrage de tout nouveau projet. À titre d'exemple de réaction nécessitant l'utilisation de ce formulaire, on y mentionne la synthèse d'un produit de recherche et de développement, la synthèse d'un produit n'ayant pas de procédure opérationnelle normalisée, la synthèse d'un produit existant généré selon un nouveau procédé chimique, la réalisation d'une synthèse à large échelle ou toute autre synthèse ou développement d'un produit potentiellement dangereux.

Les différentes sections du formulaire permettent d'identifier le rôle de chaque composé chimique dans la réaction, les risques, les mesures de sécurité, les équipements de protection individuels requis et les personnes responsables de superviser, de réaliser ou d'assister la synthèse. Enfin, en cas de survenance d'une situation anormale ou d'un accident, une section permet d'identifier les mesures de contrôle supplémentaires à mettre en place.

Avant de démarrer la synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 , le formulaire d'analyse des risques n'a pas été complété. L'employeur justifie cette absence d'analyse des risques par la réalisation d'une réaction de synthèse basée sur un protocole d'un article scientifique.

Le formulaire d'analyse des risques a été complété seulement une fois, c'est-à-dire que pour l'accident de travail survenu en 2021, à l'origine de l'implantation dudit formulaire.

4.2.6 Équipements de protection individuels

L'employeur possède une procédure de sécurité en laboratoire. En 2017, tous les travailleurs en ont été informés. D'après cette procédure, les travailleurs dans le laboratoire doivent porter des lunettes de sécurité et un sarrau en tout temps. Lorsqu'ils travaillent ou effectuent des manipulations, ils doivent en plus porter des gants, des chaussures fermées ainsi que des pantalons longs.

Une affiche apposée sur la porte du laboratoire mentionne que l'accès au laboratoire est permis seulement au personnel autorisé. De plus, cette affiche indique au moyen de pictogrammes les équipements de protection individuels requis, soit les lunettes de sécurité, le sarrau, les chaussures fermées et les gants.

Au moment de l'accident, le directeur de laboratoire portait des lunettes de sécurité, un t-shirt, des pantalons courts (shorts) et des sandales. Il ne portait donc pas de sarrau, de pantalons longs, de souliers fermés, ni de gants. Les autres travailleurs dans le laboratoire portaient tous un sarrau,

des lunettes de sécurité, des pantalons longs et des souliers fermés. Il est à noter que le président, qui était dans le laboratoire au moment de l'accident, ne portait pas de sarrau.

4.2.7 Exigences légales, réglementaires et normatives

Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) (L.R.Q., c. S -2.1)

La LSST définit les obligations générales de l'employeur. Parmi celles-ci, elle mentionne que :

51. L'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour protéger la santé et assurer la sécurité et l'intégrité physique du travailleur. Il doit notamment :
- 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;
 - 11° fournir gratuitement au travailleur [...] les moyens et équipements de protection individuels ou collectifs déterminés par règlement et s'assurer que le travailleur, à l'occasion de son travail, utilise ces moyens et équipements.

Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) (S-2.1, r. 13)

Le RSST définit à la sous-section 2 de la section X les exigences relatives aux gaz comprimés, dont celles-ci :

77. Bouteille de gaz comprimé : Toute bouteille de gaz comprimé doit être :
- 2° tenue à l'écart de toute source de chaleur et ne pas être exposée à des températures supérieures à 50 °C;
 - 3° utilisée aux fins pour lesquelles elle est destinée.

La section XXX définit les exigences relatives aux moyens et équipements de protection individuels ou collectifs, dont celle-ci :

345. Protecteurs pour les autres parties du corps : Le port d'un équipement de protection approprié à la nature de son travail, tel qu'une cagoule, un tablier, des jambières, des manchettes et des gants, est obligatoire pour tout travailleur exposé à des objets brûlants, tranchants ou qui présentent des arêtes vives ou des saillies dangereuses, à des éclaboussures de métal en fusion, ou au contact de matières dangereuses.

4.3 Énoncés et analyse des causes

4.3.1 Lors de la réaction de synthèse du 1,2 dibromoéthane- d_4 , la décomposition de l'acétylène- d_2 contenu dans un cylindre provoque une explosion et cause des blessures mortelles au directeur du laboratoire

Un des réactifs qui est nécessaire pour la synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 est l'acétylène- d_2 . Celui-ci est sous forme gazeuse à température ambiante et à pression atmosphérique. Il est contenu dans un cylindre sous pression. Lorsque l'acétylène est mis sous pression, si les conditions du maintien de sa stabilité ne sont pas en place, il peut se décomposer violemment avec un dégagement de chaleur et exploser.

Au moment de l'accident, les conditions de stockage et d'utilisation de l'acétylène- d_2 a favorisé sa décomposition et a entraîné une augmentation de la pression interne du cylindre alors que la valve de celui-ci était en position fermée. La pression a dépassé alors la résistance du cylindre et l'a fait éclater en quatre fragments métalliques. Ces fragments ont été propulsés par la force de l'explosion. Un fragment de 11 cm par 7 cm a été projeté en direction du directeur du laboratoire qui était positionné devant le cylindre. Le fragment a pénétré son abdomen. L'explosion du cylindre lui a causé des blessures qui ont entraîné son décès.

Ainsi, en raison de l'utilisation de l'acétylène dans des conditions qui ne permettaient pas d'assurer sa stabilité, le directeur de laboratoire a été exposé à un danger d'explosion.

Cette cause est retenue.

4.3.2 La méthode de dégel du cylindre d'acétylène expose le directeur du laboratoire à un danger d'explosion

Le matin de l'accident, vers 10 h, le directeur du laboratoire poursuivait la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 qu'il avait commencé la veille. Après un certain moment, il a apporté des ajustements au montage. Il a immergé le cylindre d'acétylène- d_2 dans l'azote liquide puis a ajusté la valve du cylindre. Il a ensuite ajouté de la glace sèche dans le bol du réacteur du produit synthétisé. Le ballon en caoutchouc installé au-dessus du réacteur s'est dégonflé complètement, indiquant une absence de pression dans le réacteur. À 11 h, il a fermé la valve du cylindre d'acétylène- d_2 et a retiré ce dernier de l'azote liquide. Quelques minutes plus tard, il a immergé à nouveau le cylindre dans l'azote liquide. À 11 h 14, le cylindre était toujours dans l'azote liquide à -196°C . À cette température, l'acétylène est sous forme solide.

Le protocole expérimental ne fait nullement mention d'abaisser la température de l'acétylène en cours de réaction. Cette action semble découler d'un problème dans la réaction de synthèse.

La veille, lors du déroulement de la même expérience, le directeur du laboratoire a d'ailleurs également interrompu la réaction en immergeant à un certain moment le cylindre d'acétylène- d_2 dans l'azote liquide. Environ 4 minutes après l'avoir retiré de l'azote liquide et avoir repris la réaction, il a rincé le cylindre à l'eau du robinet pendant environ 1 minute puis a repris ensuite la réaction.

La journée de l'accident, entre 11 h 15 et 11 h 30, le directeur du laboratoire a retiré le cylindre de l'azote liquide puis l'a réinstallé au montage de la réaction, à température ambiante. C'est vers 11 h 30 que l'explosion est survenue.

Les caméras de surveillance n'ont pas capté la période entre 11 h 15 et 11 h 30 et aucun témoin n'a vu les actions posées par le directeur du laboratoire juste avant l'explosion.

Cependant, plusieurs fragments de plastique de couleur bleue provenant d'un pistolet thermique MASTERCRAFT ont été projetés dans le laboratoire de même qu'en direction du directeur du laboratoire. Le cordon électrique du pistolet a été arraché à ce dernier et la fiche électrique n'était plus raccordée à une prise. Le directeur du laboratoire a subi des blessures importantes à sa main droite. Ces éléments démontrent la présence du pistolet thermique et de la main du directeur du laboratoire à proximité du foyer de l'explosion, ce qui soutient la thèse de l'utilisation du pistolet thermique.

Également, le pistolet thermique possède trois niveaux de température. Les positions 1, 2, et 3 correspondent respectivement à des températures de 25 °C, 350 °C et 550 °C. Des taches de sang ont été trouvées sur le chiffre 3 de l'interrupteur du pistolet, pouvant laisser supposer que le plus haut degré de température ait été utilisé.

À la lueur de ces informations, contrairement à la veille où le directeur du laboratoire a rincé le cylindre glacé à l'eau du robinet, il aurait décidé cette fois d'utiliser un pistolet thermique pour dégeler le cylindre.

L'acétylène est un gaz extrêmement inflammable. Lorsqu'il est mis sous pression, il peut se décomposer violemment avec un dégagement de chaleur et exploser. La décomposition peut être initiée par un choc, une élévation brusque de température ou une réaction avec une autre substance.

Tenant compte des propriétés explosives de l'acétylène et de sa mise sous pression, une grande et soudaine variation de température est susceptible de provoquer l'instabilité et la décomposition violente de l'acétylène.

L'utilisation d'un pistolet thermique pouvant émettre une chaleur jusqu'à 550 °C sur le cylindre qui a été immergé quelques minutes auparavant dans l'azote liquide à -196 °C aurait favorisé la décomposition de l'acétylène.

Ainsi, l'utilisation d'un pistolet thermique pour dégeler le cylindre d'acétylène était une méthode dangereuse qui a entraîné l'explosion.

Cette cause est retenue.

4.3.3 L'identification déficiente des risques avant d'entreprendre la réaction de synthèse entraîne la manipulation d'acétylène dans des conditions dangereuses

L'acétylène- d_2 est nécessaire pour la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane- d_4 . Comme son coût d'achat est élevé, il est synthétisé dans le laboratoire à partir de carbure de calcium (CaC_2) auquel est ajoutée de l'eau deutérée (D_2O). La veille de l'accident, le directeur du laboratoire a

utilisé 103 g de CaC_2 pour synthétiser l'acétylène- d_2 . Il a emmagasiné ce dernier dans un cylindre d'échantillonnage de marque SWAGELOK d'une capacité de 500 ml.

Selon la norme ISO 3807 *Bouteilles à gaz – Bouteilles d'acétylène – Exigences fondamentales et essais de type*, en raison de l'instabilité de l'acétylène, la bouteille d'acétylène doit contenir une matière poreuse. De plus, cette matière est généralement saturée d'un solvant dans lequel l'acétylène est dissout. La combinaison de ces deux mesures permet le stockage de l'acétylène dans un cylindre à une pression modérée qui prévient le risque de décomposition explosive.

Le cylindre utilisé par le directeur du laboratoire était exempt de matière poreuse et de solvant. Ce cylindre n'était ainsi pas conçu pour emmagasiner l'acétylène, car il ne respectait pas les recommandations de la norme ISO 3807 mentionnées ci-haut. Le fournisseur de ce cylindre spécifie que lors de la sélection d'un cylindre, l'utilisateur est responsable de s'assurer notamment de la fonction, de la compatibilité des matériaux, des limites de pression et de température ainsi que de l'opération appropriée du cylindre pour garantir la sécurité. La pression de service maximale recommandée par ce fournisseur est de 1 800 psi (12 410 kPa) pour des températures situées entre $-53\text{ }^\circ\text{C}$ et $37\text{ }^\circ\text{C}$. Le fournisseur ne recommande pas d'utiliser le produit en dehors de ces plages de pression et de température.

Pour remplir le cylindre d'acétylène- d_2 et en cours de l'expérimentation, le directeur du laboratoire a congelé le cylindre dans l'azote liquide à $-196\text{ }^\circ\text{C}$ à plusieurs reprises. Également, il a utilisé un pistolet thermique pouvant générer une température de $550\text{ }^\circ\text{C}$. Le cylindre a par conséquent été exposé à des températures dépassant les limites inférieures et supérieures recommandées par le fournisseur.

Par ailleurs, selon la norme CGA G-1 : *Acetylene*, la pression maximale dans un cylindre d'acétylène ne doit pas dépasser 250 psi (1 720 kPa) à une température de $21,1\text{ }^\circ\text{C}$.

En se basant sur la quantité de carbure de calcium (CaC_2) utilisée dans la réaction de synthèse, la quantité théorique d'acétylène- d_2 produite aurait été de 45 g. Cependant, en pesant le cylindre, le directeur du laboratoire a obtenu une masse d'environ 60 g. Comme la quantité supérieure obtenue ne peut être expliquée, pour être conservateur, la masse théorique de 45 g a été utilisée pour estimer la pression interne du cylindre. Le remplissage de l'acétylène- d_2 dans un cylindre de 500 ml représenterait, à température ambiante, un volume de 41,3 L d'acétylène. L'acétylène peut être à l'état liquide, solide ou gazeux en fonction des paramètres de température et de pression auxquelles il est soumis.

Compte tenu de l'absence de mesures de pression et de la congélation du cylindre dans l'azote liquide quelques minutes avant l'accident, il est difficile de déterminer la pression réelle dans le cylindre au moment de l'explosion. D'après l'employeur, la pression dans le cylindre n'était pas très élevée, soit environ 3 à 4 psi (20,7 à 27,6 kPa).

Dans le cas où l'acétylène dans le cylindre se comporterait selon la loi des gaz parfaits, la pression théorique calculée qu'il aurait générée dans le cylindre à la suite du remplissage serait de 1 138 psi (ou 7 848 kPa). Cette valeur demeure toutefois théorique, car au-delà de certaines valeurs de température et de pression, les gaz cessent de se comporter selon la loi des gaz parfaits.

Bien que cette valeur théorique soit inférieure à la pression maximale prescrite par le fournisseur du cylindre, elle est presque 5 fois supérieure à la pression de 250 psi (1 720 kPa) à ne pas dépasser selon la norme CGA G-1 : *Acetylene*. D'autant plus que cette limite est fixée pour un cylindre conçu pour l'entreposage d'acétylène, ce qui n'était pas le cas.

Avant de démarrer la synthèse du 1,2-dibromoéthane-*d*₄, le formulaire d'analyse des risques n'a pas été complété. L'employeur justifie cette absence d'analyse des risques par le fait que la réaction de synthèse était basée sur un protocole d'un article scientifique. Cependant, d'importantes modifications au protocole ont été apportées. Tout d'abord, au cours des réactions de synthèse de l'acétylène-*d*₂ et du 1,2-dibromoéthane-*d*₄, aucun instrument n'a été utilisé pour mesurer la pression interne du cylindre ni pour connaître la pression de service. De plus, une plus grande quantité de CaC₂ a été utilisée, soit 103 g au lieu de 75 g. Il s'agissait d'ailleurs de la quantité la plus importante de réactif de départ utilisée depuis le début des essais. Enfin, un contenant de 0,5 L a été utilisé pour contenir l'acétylène-*d*₂ au lieu d'un contenant de 8 L.

Ces modifications ont donc fait en sorte d'augmenter considérablement la pression de l'acétylène-*d*₂ dans le cylindre. La forte pression interne du cylindre a peut-être nui au bon déroulement de la réaction et peut fournir une explication de la raison pour laquelle le cylindre d'acétylène a été congelé en cours de la réaction, c'est-à-dire afin d'en diminuer la pression de service.

De façon générale, l'employeur ne s'assure pas du respect des règles de sécurité pour le travail en laboratoire. Tout d'abord, malgré la présence d'une affiche et d'une procédure de sécurité en laboratoire, le directeur de laboratoire ne portait pas au moment de l'accident de sarrau et était vêtu d'un pantalon court (shorts) et de sandales.

De plus, malgré l'implantation en 2021 d'un formulaire d'analyse des risques qui devait être rempli avant toute nouvelle réaction de synthèse, l'employeur ne s'est pas assuré de faire appliquer ce formulaire au démarrage de ce nouveau projet de synthèse en mai 2022. Le directeur du laboratoire a effectué également des modifications au protocole de l'article scientifique de 1952, ce qui l'a exposé à de nouveaux risques en plus de ceux existants.

Ainsi, l'employeur ne s'est pas assuré d'identifier, de contrôler et d'éliminer les risques pouvant affecter la santé et la sécurité du travailleur en permettant l'utilisation d'un cylindre exempt de matière poreuse, non prévu pour le stockage de l'acétylène et au-delà des températures recommandées du fournisseur.

L'identification déficiente des risques a donc fait en sorte que la réaction de synthèse du 1,2-dibromoéthane-*d*₄ a été réalisée dans des conditions dangereuses.

Cette cause est retenue.

SECTION 5

5 CONCLUSION

5.1 Causes de l'accident

- 1- Lors de la réaction de synthèse du 1,2 dibromoéthane- d_4 , la décomposition de l'acétylène- d_2 contenu dans un cylindre provoque une explosion et cause des blessures mortelles au directeur du laboratoire.
- 2- La méthode de dégel du cylindre d'acétylène expose le directeur du laboratoire à un danger d'explosion.
- 3- L'identification déficiente des risques avant d'entreprendre la réaction de synthèse entraîne la manipulation d'acétylène dans des conditions dangereuses.

5.2 Autres documents émis lors de l'enquête

Le rapport d'intervention RAP9142878, daté du 22 juillet 2022, consigne la décision d'interdiction d'accès au laboratoire aux fins d'enquête.

Le rapport d'intervention RAP1394309, daté du 1^{er} août 2022, est le rapport complémentaire du rapport mentionné ci-haut (RAP9142878).

Le rapport d'intervention RAP1394366, daté du 2 août 2022, consigne la levée de la décision d'interdiction d'accès au laboratoire et autorise à ce que les lieux soient modifiés. De plus, trois nouvelles décisions y sont rendues : une interdiction de travaux de synthèse de 1,2-dibromoéthane- d_4 , une interdiction de fabrication d'acétylène et une interdiction d'utilisation des pistolets thermiques dans le laboratoire.

5.3 Suivis de l'enquête

À titre préventif et aux fins d'informations, la CNESST transmettra son rapport d'enquête à l'Ordre des chimistes, à l'Association des chimistes et biochimistes du Québec (ACBQ), à l'Association du personnel de la recherche du Québec (APRQ), à l'Association pour le Développement et l'Innovation en Chimie au Québec (ADICQ), aux associations sectorielles paritaires et aux gestionnaires de mutuelles afin qu'ils informent leurs membres pouvant être concernés par l'enquête et ses conclusions.

Dans le cadre de son partenariat avec la CNESST visant l'intégration de la santé et de la sécurité dans la formation professionnelle et technique, le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MEES) diffusera, à titre informatif et à des fins pédagogiques, le rapport d'enquête dans les établissements de formation qui offrent les programmes d'études : Technique de laboratoire (Technique), Métallurgie (Professionnelle).

ANNEXE A**Accidenté**

Nom, prénom : A [REDACTED]

Sexe : Masculin

Âge : [REDACTED]

Fonction habituelle : [REDACTED]

Fonction lors de l'accident : Directeur du laboratoire

Expérience dans cette fonction : [REDACTED]

Ancienneté chez l'employeur : [REDACTED]

Syndicat : Sans objet

ANNEXE B**Liste des personnes interrogées**

Monsieur Sunil Varshney, président

Madame Neelima Varshney, directrice générale

Monsieur **B** [REDACTED]

Monsieur **C** [REDACTED]

Madame **D** [REDACTED]

ANNEXE C

Calculs

1- Quantité (g) d'acétylène- d_2 (C_2D_2) calculée :

	$CaC_2 + 2D_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2D_2$		
Masse moléculaire (g/mol) :	64	20	28
Quantité de départ (g) :	103		
Quantité (mol) :	1,61	3,22	1,61
Quantité théorique calculée (g) :	64,4		45

2- Quantité (mol) d'acétylène- d_2 (C_2D_2) obtenue :

Masse moléculaire de C_2D_2 : 28 g/mol

Quantité (g) de C_2D_2 obtenue : ≈ 60 g

Quantité (mol) de C_2D_2 : $\frac{60 \text{ g}}{28 \text{ g/mol}} = 2 \text{ mol}$

3- Quantité (mol) de DBr :

Selon la réaction de synthèse de 1,2-dibromoéthane- d_4 ($C_2D_4Br_2$) décrite ci-dessous, il faut 2 molécules de DBr pour 1 molécule de C_2D_2 . Ainsi, pour 2 moles de C_2D_2 , il faut 4 moles de DBr.

	$C_2D_2 + 2DBr \rightarrow C_2D_4Br_2$	
Quantité (mol) :	2	4

4- Quantité (mol) de PBr_3 et de D_2O :

À partir de ce nombre de moles, la quantité nécessaire des réactifs de départ dans la réaction intermédiaire de synthèse du DBr a été calculée, telle que décrite ci-dessous :

	$PBr_3 + 3D_2O \rightarrow P(OH)_3 + 3DBr$		
Masse moléculaire (g/mol) :	271	20	82
Quantité approximative (mol) :	1,33	4	4
Quantité réelle de départ (g) :	410	95	
Quantité réelle de départ (mol) :	1,513	4,54	4,54

5- Volume d'acétylène contenu dans le cylindre :

Densité de l'acétylène à 20 °C et à pression atmosphérique (101 kPa) : 1,0896 g/L
Quantité (g) d'acétylène théorique = 45 g

Volume d'acétylène (V) :

$$V = 45 \text{ g} \times \frac{1 \text{ L}}{1,0896 \text{ g}}$$

$$V = 41,3 \text{ L}$$

6- Pression interne du cylindre d'acétylène-d₂ :

Loi des gaz parfaits : $PV = nRT$

P : Pression dans le cylindre = ?

V : Volume du cylindre = 0,5 L

n : Nombre de moles d'acétylène = 1,61 mol

R : Constante des gaz parfaits = 8,314 kPa·L/mol·K

T : Température = 293,15 K (20 °C)

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$P = \frac{1,61 \text{ mol} * 8,314 \text{ kPa} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K} * 293,15 \text{ K}}{0,5 \text{ L}} = 7\,848 \text{ kPa (1\,138 psi)}$$

ANNEXE D**Références bibliographiques**

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. *Bouteilles à gaz cylindriques et sphériques et tubes pour le transport des marchandises dangereuses*, 7^e édition, Toronto, CSA, 2018, 174 p. (CSA B339-18).

BOC LIMITED. *Facts about acetylene*, Manchester, Boc Limited, 2018, 11 p. [https://www.boconline.co.uk/en/images/Facts-about-acetylene_tcm410-262700.pdf].

COMMISSION DES NORMES, DE L'ÉQUITÉ, DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL. RÉPERTOIRE TOXICOLOGIQUE. Acétylène, [En ligne], 2017. [https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=497&no_seq=1&t=ac%C3%A9tyl%C3%A8ne] (Consulté le 8 février 2023).

COMPRESSED GAS ASSOCIATION. *Acetylene*, 13th edition, Chantilly, Virg., CGA, 2015, 12 p. (CGA G-1-2015).

GANNON, Richard E., et autres. « Acetylene », dans *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 5th edition, 2000, p. 177 à 227.

HOOKER, Phil, et autres. « Investigation of an acetylene cylinder explosion incident », *Symposium series*, no 161, 2016, 13 p. [<https://www.icheme.org/media/11834/hazards-26-paper-06-investigation-of-an-acetylene-cylinder-explosion-incident.pdf>].

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ. *Acétylène : fiche toxicologique no 212*, [En ligne], 2019. [https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_212] (Consulté le 8 février 2023).

KENT, James A., Tilak V. BOMMARAJU, et Scott D. BARNICKI. *Handbook of industrial chemistry and biotechnology*, 13th edition, Cham, Suisse, Springer, 2017, 3 volumes.

LEITCH, L.C. et A.T. MORSE. « Synthesis Of Organic Deuterium Compounds: III. 1,2-Dibromoethane-D₄ And Its Derivatives », *Canadian Journal of Chemistry*, vol. 30, no 12, Dec. 1952, p. 924-932. [<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/v52-112>].

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. *Bouteilles à gaz : bouteilles d'acétylène : conditions de remplissage et de contrôle au remplissage*, 3^e édition, Genève, ISO, 2011, 14 p. (ISO 11372:2011).

ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. *Bouteilles à gaz : bouteilles d'acétylène : exigences fondamentales et essais de type*, 2^e édition, Genève, ISO, 2013, 30 p. (ISO 3807:2013).

PASSLER, Peter, et autres. « Acetylene », dans *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, Wiley Online Library, 2011, p. 277-326.

QUÉBEC. *Loi sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, chapitre S-2.1, à jour au 15 octobre 2022*, [En ligne]. 2022. [<https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/S-2.1%20/>] (Consulté le 8 février 2023).

QUÉBEC. *Règlement sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, chapitre S-2.1, r. 13, à jour au 1^{er} août 2022*, [En ligne], 2022. [<https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/s-2.1,%20r.%2013>] (Consulté le 8 février 2023).

SWAGELOK. *Sample Cylinders, Accessories, and Outage Tubes*, Swagelok, Solon, Ohio, Swagelok, 2022, 8 p. [<https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/ms-01-177.pdf>].

TROTUS, Ioan-Teodor, Tobias ZIMMERMANN, et Ferdi SCHÜTH. « Catalytic reactions of acetylene : a feedstock for the chemical industry revisited », *Chemical reviews*, vol. 114, no 3, 2014, p. 1761-1782. [<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/cr400357r>].

UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA. ENVIRONMENTAL HEALTH AND RADIATION SAFETY. *Occupational Safety Fact Sheet Compressed Acetylene Gas*, Pennsylvanie, EHR, 2012, 2 p. [<https://ehrs.upenn.edu/sites/default/files/2018-02/Acetylene%20Fact%20Sheet.pdf>].