

Rapport d'enquête

Sur plusieurs explosions survenues à l'intérieur d'un bâtiment de fabrication de nitrocellulose au sein de la société Manuco (24) le 3 août 2022

Bordereau documentaire

Organisme auteur : Bureau d'enquêtes et d'analyses sur les risques industriels (BEA-RI)

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur plusieurs explosions survenues à l'intérieur d'un bâtiment de fabrication de nitrocellulose au sein de la société Manuco le 3 août 2022 (24)

N° : MTECT-BEARI-2023-007

Date du rapport : 15 novembre 2023

Proposition de mots-clés : explosion, nitrocellulose, travaux, sous-traitance.

Avertissement

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 501-1 à L. 501-19 du Code de l'Environnement.

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités.

En conséquence, l'utilisation de ce rapport à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

Au titre de ce rapport on entend par :

- Cause de l'accident : toute action ou événement de nature technique ou organisationnelle, volontaire ou involontaire, active ou passive, ayant conduit à la survenance de l'accident. Elle peut être établie par les éléments collectés lors de l'enquête, ou supposée de manière indirecte. Dans ce cas le rapport d'enquête le précise explicitement ;
- Facteur contributif : élément qui, sans être déterminant, a pu jouer un rôle dans la survenance ou dans l'aggravation de l'accident ;
- Enseignement de sécurité : élément de retour d'expérience tiré de l'analyse de l'évènement. Il peut s'agir de pratiques à développer car de nature à éviter ou limiter les conséquences d'un accident, ou à éviter car pouvant favoriser la survenance de l'accident ou aggraver ses conséquences ;
- Recommandation de sécurité : proposition d'amélioration de la sécurité formulée par le BEA-RI, sur la base des informations rassemblées dans le cadre de l'enquête de sécurité, en vue de prévenir des accidents ou des incidents. Cette recommandation est adressée, au moment de la parution du rapport définitif, à une personne physique ou morale qui dispose de deux mois à réception, pour faire part au BEA des suites qu'elle entend y donner. La réponse est publiée sur le site du BEA-RI.

Synthèse

L'incident a eu lieu le mercredi 3 août 2022 vers 13h50, alors que la plateforme au sein de laquelle est situé l'établissement MANUCO, situé boulevard Charles GARAUD à Bergerac (24), est en arrêt annuel estival depuis une semaine. L'atelier de production à l'origine de l'accident était arrêté quant à lui depuis fin juin.

Les ouvriers de plusieurs entreprises sous-traitantes travaillent sur différents chantiers au sein du bâtiment. Lors du raccordement de deux tuyauteries, un ouvrier utilise une clé à chocs pour visser un boulon. Une première explosion survient à cet instant, projetant les ouvriers au sol et soufflant une partie du mur en brique qui se trouve à proximité.

En moins d'une minute, plusieurs explosions se produisent et soufflent au fur et à mesure de leur propagation différents outils de production, la toiture et certaines parties des murs du bâtiment. Un incendie survient à l'issue de celles-ci, et complique l'intervention des secours, qui dénombreront sept blessés légers et un blessé grave. Le plan d'opération interne est déclenché.

Aucune pollution environnementale des eaux et des sols n'a été constatée.

A l'issue de l'enquête, le BEA-RI a émis des recommandations à l'attention de l'exploitant :

Au plan technique

Le BEA-RI recommande de :

- **Retirer et décontaminer les équipements, matériels et canalisations abandonnés dans le cadre du process** pour éviter tous risques de dépôt de poussières de nitrocellulose **et de mettre en place une procédure de gestion des appareils inutilisés ;**
- **Intégrer les contraintes de nettoyage dans la conception des canalisations et des équipements afin de réduire le phénomène de dépôt de nitrocellulose ;**
- **De réduire au maximum le stockage de produits finis et de déchets dans le bâtiment concerné en privilégiant les zones de stockage dévolues à cet effet.**

Au plan organisationnel

Le BEA-RI recommande de :

- **Renforcer la préparation des interventions hors d'eau** sur la base d'une analyse de risque qui identifie les mesures techniques et organisationnelles à mettre en œuvre (durée de l'intervention, modalités de nettoyage et de consignation des installations, mesures de prévention ou mesures compensatoires, définition de la mission de surveillant, ...) pour garantir la sécurité des opérateurs et des installations ;
- **Inclure dans les procédures de consignation, la vérification croisée entre la maintenance et la production, de l'état de nettoyage des circuits consignés ;**
- **Conduire une réflexion sur les risques nouveaux induits par le changement climatique**, et en particulier le phénomène de canicule, sur les activités du site et en vue d'adapter les pratiques et les consignes de sécurité ;

- **Renforcer la sensibilisation des intervenants (opérateurs et sous-traitants) sur l'incidence des conditions de séchage de la nitrocellulose vis-à-vis de sa stabilité**, notamment lorsque le séchage et/ou le taux d'humidité n'est pas contrôlé comme lors des opérations de maintenance ;
- **Renforcer la surveillance des sous-traitants afin de s'assurer du respect des consignes du permis de travail et sensibiliser les personnels de MANUCO quant aux responsabilités qui sont les leurs concernant la vigilance de l'application de ces consignes.**

Sommaire

| | | |
|-------|--|----|
| I. | Rappel sur l'enquête de sécurité..... | 8 |
| II. | Constats immédiats et engagement de l'enquête | 8 |
| | II.1 Les circonstances de l'accident | 8 |
| | II.2 Le bilan de l'accident | 9 |
| | II.3 Les mesures prises après l'accident..... | 9 |
| | II.4 L'engagement et l'organisation de l'enquête | 10 |
| III. | Contextualisation | 10 |
| | III.1 L'entreprise..... | 10 |
| | III.1.1 Présentation de l'entreprise | 10 |
| | III.1.2 Présentation de l'activité..... | 11 |
| | III.1.3 L'environnement du site..... | 11 |
| | III.2 L'installation..... | 12 |
| | III.2.1 Le fonctionnement | 12 |
| | III.2.2 L'équipement | 12 |
| | III.2.3 Situation de l'installation au moment de l'accident..... | 13 |
| IV. | Compte-rendu des investigations menées..... | 14 |
| | IV.1 Reconnaissance de terrain | 14 |
| | IV.2 Intervention de l'inspection des installations classées | 14 |
| | IV.3 Expertise de l'INERIS..... | 14 |
| V. | Déroulement de l'évènement..... | 15 |
| | V.1 Déclenchement de l'évènement..... | 15 |
| | V.2 La succession d'explosions | 16 |
| | V.3 L'intervention des secours publics | 17 |
| VI. | Conclusions sur le scénario de l'évènement..... | 18 |
| | VI.1 Le scénario | 18 |
| | VI.2 Analyse de l'INERIS | 21 |
| VII. | Facteurs contributifs | 23 |
| | VII.1 Les équipements abandonnés..... | 23 |
| | VII.2 Les procédures de nettoyage des installations | 24 |
| | VII.2.1 Nettoyage interne des canalisations..... | 24 |
| | VII.2.2 Nettoyage des fines dans l'atelier..... | 25 |
| | VII.3 Le rôle des personnels de MANUCO durant les travaux de maintenance | 26 |
| | VII.4 Les conditions de travail et le sentiment des intervenants vis-à-vis du risque | 26 |
| | VII.5 L'absence de notion de dangerosité du bâtiment et des opérations | 26 |
| | VII.6 Les températures caniculaires sévissant depuis plusieurs jours | 28 |
| | VII.7 Les stockages de produits finis dans l'atelier | 28 |
| VIII. | Enseignements de sécurité | 29 |
| | VIII.1 La suppression des matériels abandonnés | 29 |
| | VIII.2 Améliorer le process de nettoyage de l'atelier | 29 |
| | VIII.3 La prévention des risques lors des opérations de maintenance..... | 29 |
| | VIII.4 L'information des intervenants | 30 |
| | VIII.5 Anticiper le réchauffement climatique sur les périodes de maintenance..... | 30 |

| | |
|---|-----------|
| IX. Recommandations de sécurité..... | 31 |
| IX.1 À destination de l'exploitant | 31 |
| IX.1.1 Au plan technique | 31 |
| IX.1.2 Au plan organisationnel | 31 |
| X. Annexes..... | 32 |
| Annexe 1 Rapport d'essais de l'INERIS | 33 |

Rapport d'enquête

Sur plusieurs explosions survenues à l'intérieur d'un bâtiment de fabrication de nitrocellulose au sein de la société MANUCO à Bergerac (24) le 3 août 2022

I. Rappel sur l'enquête de sécurité

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 501-1 à L. 501-19 du Code de l'Environnement. Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités. En conséquence, l'utilisation de ce rapport à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

II. Constats immédiats et engagement de l'enquête

II.1 Les circonstances de l'accident

L'incident a eu lieu le mercredi 3 août 2022 vers 13h50, alors que la plateforme au sein de laquelle est situé l'établissement MANUCO, situé boulevard Charles GARAUD à Bergerac (24), est en arrêt annuel estival depuis une semaine. L'atelier de production à l'origine de l'accident était arrêté quant à lui depuis fin juin.

Les ouvriers de plusieurs entreprises sous-traitantes travaillent sur différents chantiers au sein du bâtiment. Alors que trois ouvriers raccordent deux tuyauteries au moyen de brides à écrous afin de mettre en service un nouveau bac de récupération des « eaux blanches¹ », un ouvrier, en haut d'un escabeau, utilise une clé à chocs pour visser un boulon. Une première explosion survient à cet instant, projetant les ouvriers au sol et soufflant une partie du mur en brique qui se trouve à proximité.

En moins d'une minute, plusieurs explosions se produisent en se déplaçant, selon les témoignages, vers le mur opposé sur la largeur du bâtiment, et soufflant au fur et à mesure de leur propagation différents outils de production, la toiture et certaines parties des murs du bâtiment.

Le plan d'opération interne est déclenché et les sapeurs-pompiers sont immédiatement prévenus.

¹ Les eaux blanches sont un mélange d'eau et de nitrocellulose qui permettent de transporter le produit d'un atelier ou d'un équipement à l'autre en sécurité.

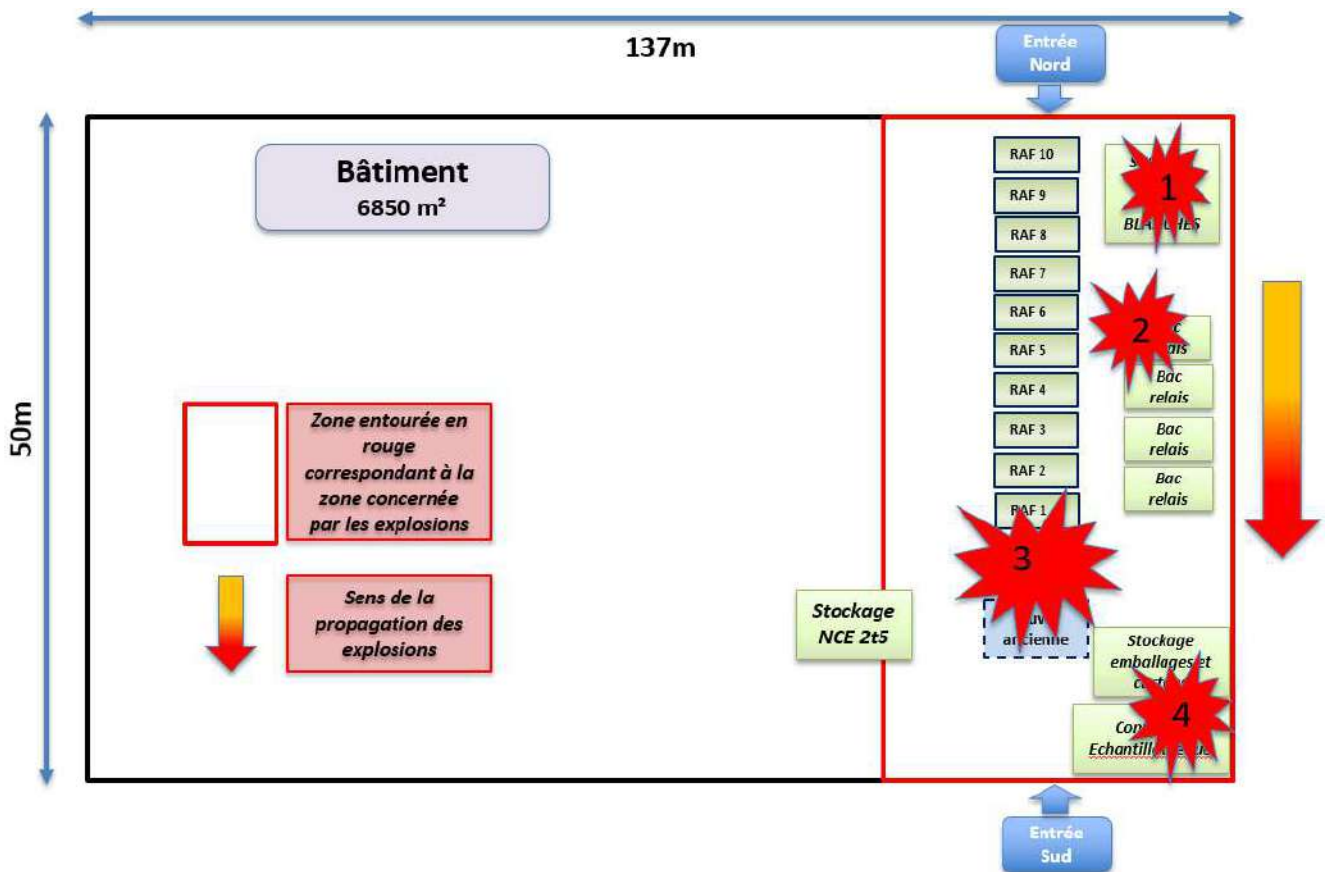


Figure 1 : Sens probable de propagation des explosions au sein du bâtiment concerné (Source BEA-RI)

II.2 Le bilan de l'accident

Les secours ont dénombré sept blessés légers et un blessé grave, ce dernier ayant été victime des projections de pièces métalliques produites par l'effet de souffle de l'explosion.

Au bout de deux jours, cinq blessés étaient sortis de l'hôpital.

Le bâtiment a subi des dégâts importants au niveau des murs et une partie de la toiture a été soufflée. De nombreux outils de production ont été fortement endommagés, et un incendie a pris naissance, détruisant un stockage d'emballages.

Un container maritime contenant environ 1 tonne d'échantillon de nitrocellulose montre des signes d'une élévation de pression interne soit par explosion soit par combustion rapide vraisemblablement initiée par la perforation de ce dernier par effet missile.

Aucune pollution environnementale des eaux et des sols n'a été constatée.

II.3 Les mesures prises après l'accident

À la suite de l'accident, le bâtiment a été condamné et des scellés judiciaires ont été posés.

Un stockage de plus de 2 tonnes de nitrocellulose présent dans l'atelier, n'a pas réagi, bien qu'impacté par un éclat métallique perforant. Il a été déplacé et mis en sécurité dans les jours qui ont suivi.

l'événement. Les sols du bâtiment sont restés sous arrosage à l'eau afin d'humidifier toute trace éventuelle de nitrocellulose présente au sol.

Un arrêté préfectoral de mesures d'urgence (APMU) a été pris par le Préfet en date du 5 août 2022. Il visait la mise en sécurité du bâtiment (arrosage, évacuation de la nitrocellulose présente) mais aussi la gestion des eaux d'extinction incendie, la vérification et remise à niveau des moyens en eau d'extinction et l'arrêt de toute opération sur les équipements contenant ou ayant contenu de la nitrocellulose au sein du site MANUCO.

II.4 L'engagement et l'organisation de l'enquête

Au vu des circonstances et du contexte de l'accident, le directeur du bureau d'enquêtes et d'analyses sur les risques industriels (BEA-RI) a décidé de l'ouverture d'une enquête technique après en avoir informé le directeur général de la prévention des risques.

Les enquêteurs techniques du BEA-RI se sont rendus sur site à deux reprises, et ont fait appel à des experts de l'INERIS dans le domaine de la pyrotechnie, de la résistance des structures et des explosions afin de déterminer les quantités de nitrocellulose ayant réagi au regard des dégâts observés.

Ils ont recueilli les témoignages et les déclarations des acteurs impliqués dans l'évènement et dans sa gestion. Ils ont eu, consécutivement à ces entretiens et aux réunions techniques organisées par la suite, communication des pièces et documents nécessaires à leur enquête.

III. Contextualisation

III.1 L'entreprise

III.1.1 Présentation de l'entreprise

La société MANUCO exploite des installations de fabrication de nitrocellulose énergétique (NCE²) à haute performance, situées au cœur de la plateforme industrielle de Bergerac. La nitrocellulose est ensuite vendue aux industries militaires et civiles dans une vingtaine de pays à travers le monde pour différents domaines d'applications (défense, explosifs civils, produits pyrotechniques, ...).

La nitrocellulose énergétique est majoritairement utilisée par les fabricants de poudre de chasse et de poudre militaire. MANUCO exporte environ 90 % de sa production.

La superficie de la plateforme est de 135 ha et la surface bâtiminaire de MANUCO est de 25 000m² environ. Chaque bâtiment possède un numéro permettant de l'identifier sur la plateforme.

Au mois d'août 2021, la société EURENCO, qui détenait déjà 50% de MANUCO, a indiqué par voie de presse l'acquisition de cette dernière par le biais d'une fusion acquisition à effet du 1^{er} octobre 2022.

L'effectif sur site de MANUCO est composé de 85 salariés, pour un chiffre d'affaire annuel de 24 millions d'euros. L'effectif cumulé des sociétés EURENCO et MANUCO est d'environ 240 employés. L'entreprise fait appel régulièrement à des prestataires de service, pouvant conduire à augmenter largement cet effectif.

² La nitrocellulose industrielle, à la différence de la NCE, concerne les laques, vernis, etc...

III.1.2 Présentation de l'activité

La nitrocellulose est le résultat d'une réaction chimique (nitration) exothermique entre la cellulose et l'acide nitrique. Suivant le degré de substitution du niveau d'azote et de polymérisation (viscosité), il existe plusieurs types de nitrocellulose dont la nitrocellulose énergétique (NCE - coton poudre) qui se caractérisent par un taux d'azote supérieur à 11,5%. Un taux inférieur caractérise la nitrocellulose « industrielle » (NCI – coton azotique).

Le fonctionnement du site est encadré par l'arrêté préfectoral n° BE-2022-07-01 du 7 juillet 2022.

L'établissement MANUCO était classé SEVESO seuil haut au titre de la rubrique 4441 (liquides comburants) depuis 2015 suite au transfert du "parc acides" de EURENCO vers MANUCO. Cependant, depuis la modification du règlement CLP du 19 mai 2020 publié le 11 août 2020, MANUCO est classé SEVESO seuil haut au titre de la rubrique 4110.2 (substances et mélanges liquides toxiques) et SEVESO seuil bas au titre de la rubrique 4130 (substances et mélanges liquides toxiques) et 4160 (Substances et mélanges réagissant violemment au contact de l'eau).

Par ailleurs, les installations exploitées par MANUCO relèvent du régime de l'autorisation au titre des rubriques 1450-1 et 3410.d de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et du régime de la déclaration pour 3 autres rubriques.



Figure 2 : Vue de l'entrée de la plateforme MANUCO EURENCO (Source BEA-RI)

III.1.3 L'environnement du site

À l'ouest du site se trouve une zone d'habitations groupées en allant vers le centre-ville de Bergerac. Les plus proches habitations se situent à environ 30 m des limites de la plateforme de Bergerac. Mais la plateforme étant de dimension importante, ces habitations sont situées à plusieurs centaines de mètres du lieu de l'accident.

Des habitations plus éparées sont situées au nord-ouest des installations de MANUCO. Au nord et au sud se trouvent principalement des zones cultivées. À l'est, se situe une zone commerciale.

III.2 L'installation

III.2.1 Le fonctionnement

Le procédé de fabrication de la nitrocellulose comprend différentes étapes :

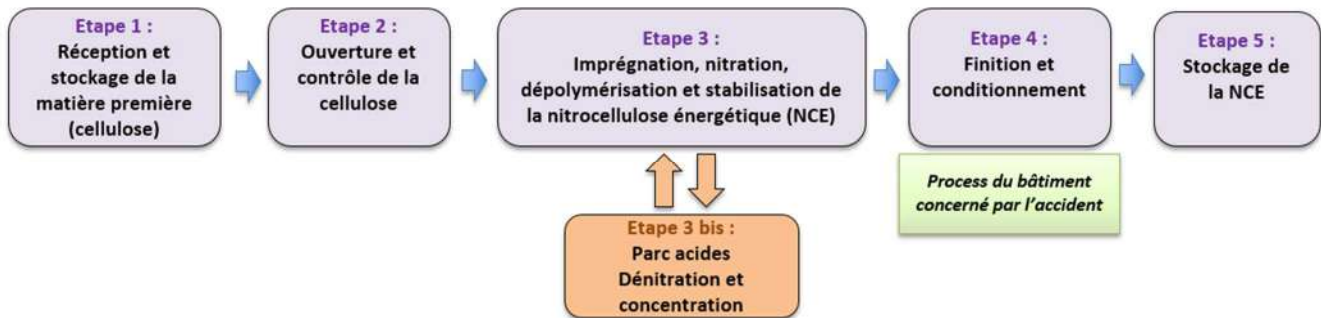


Figure 3 : Process de fabrication de la nitrocellulose énergétique (Source BEARI)

Le bâtiment objet de l'accident, permettait la réalisation de la quatrième étape du schéma ci-dessus.

Cette étape consiste à raffiner le produit, c'est-à-dire à lui donner la finesse désirée par le client, puis à le conditionner avant envoi aux clients.

L'organisation de la production au sein de la société MANUCO repose sur deux ateliers, chacun sous la responsabilité d'un responsable de la production :

- 1 chef d'atelier secteur « Finissage » intégrant les activités du bâtiment concerné par l'accident ;
- 1 chef d'atelier secteur « Acides » comprenant la gestion du parc acides notamment.

Ces chefs d'atelier sont rattachés hiérarchiquement au responsable de production et encadrent 5 chefs d'équipe en subordonnés directs. Chaque équipe comprend 6 à 7 opérateurs.

III.2.2 L'équipement

Le bâtiment concerné s'étend sur une surface de 6 850m² et mesure 137m de longueur pour 50m de largeur.

Il regroupe les équipements de finition et de conditionnement de la nitrocellulose énergétique (NCE) dont notamment le raffinage de cette dernière. Le raffinage consiste à retravailler la matière par une succession d'épaisseurs et de raffineurs pour réduire la dimension des fibres par cisaillement mécanique.

La nitrocellulose, en provenance de l'atelier « stabilisation », situé dans un bâtiment proche, arrive dans le bâtiment dans sa partie « Est » (du côté où se sont produites les explosions) par le biais de canalisations « d'eaux blanches ».

A leur arrivée dans le bâtiment, les eaux blanches sont stockées dans des bacs tampon puis orientées vers les raffineurs et épaisseurs qui sont en charge de hâcher les fibres afin d'affiner le produit. Il en ressort une pâte, qui est ensuite transportée vers les bacs « eaux blanches ». Le mélange est ensuite essoré et séché jusqu'à la concentration souhaitée.

Les résidus de nitrocellulose sont placés dans des contenants spéciaux (fûts bleus sous eau) et évacués au brûloir du site.

Le bâtiment regroupe des opérations dans lesquelles la nitrocellulose est soit en suspension dans l'eau soit avec des taux d'humidité tels, qu'elle est considérée comme stable. Le bâtiment n'est pas considéré comme relevant de la réglementation sur le risque pyrotechnique au titre du code du travail, du code de la défense ou encore du code de l'environnement.

III.2.3 Situation de l'installation au moment de l'accident

Suite à une fuite sur un échangeur à l'atelier dénitration, en amont du process, une partie de l'activité au sein du bâtiment était à l'arrêt depuis le 25 juin et le nettoyage succinct des installations de raffinage avait été réalisé le 30 juin, en attendant une éventuelle reprise d'activité avant les travaux de maintenance annuelle des installations.

Cet arrêt partiel a été maintenu jusqu'au mercredi 20 juillet. La pièce de rechange n'ayant pas été reçue à cette date, le nettoyage de l'atelier par les personnels de « la production » a été finalisé les jeudi 21 et vendredi 22 juillet.

Les opérateurs suivent alors une check-list reprenant les différentes actions à réaliser permettant la mise à l'arrêt des installations. Une fois que les équipements sont considérés propres et prêts pour recevoir les travaux de maintenance, ces derniers sont consignés. Pour cela, des cadenas de consignation sont alors posés et un cahier de consignation est rempli et signé par chaque intervenant.

Les consignations de l'atelier ont été réalisées le vendredi 22 juillet, permettant de rendre ce dernier à l'équipe « maintenance » avant le début des travaux.

Les travaux de maintenance estivaux étaient planifiés entre le 25 juillet et le 15 août 2022, et les travaux à réaliser durant cette période avaient été définis longtemps auparavant, plusieurs réunions préparatoires ayant eu lieu depuis le début de l'année. Ces réunions étaient pilotées par le responsable maintenance et travaux neufs et pouvaient réunir le responsable production, les 2 chefs d'atelier concernés, la direction de l'établissement, les personnels du service maintenance et la responsable HSE, ainsi que, en fonction des sujets, toutes autres personnes impliquées dans la réalisation des travaux.

Le service maintenance prend, à l'issue des travaux de nettoyage et de la consignation du 22 juillet, l'installation en l'état et débute les travaux à réaliser avec les entreprises sous-traitantes. Un chef d'atelier et un chef d'équipe du service production sont présents tous les jours sur site afin d'apporter toutes précisions concernant le fonctionnement ou la sécurité des installations.

IV. Compte-rendu des investigations menées

IV.1 Reconnaissance de terrain

Les enquêteurs techniques du BEA-RI se sont rendus sur site le jeudi 4 août 2022, où ils ont pu rencontrer les représentants de la société MANUCO et réaliser une première visite de l'extérieur du bâtiment concerné en présence de l'officier de police judiciaire en charge de l'enquête, de l'inspection des installations classées, de l'OCLAESP³, de l'inspection du travail et de la police judiciaire de Bordeaux.

Les auditions des premiers témoins et personnels intervenants ont débuté le lundi 8 août par les services de police judiciaire.

Puis, les différents services se sont retrouvés à nouveau le mardi 9 août afin d'inspecter l'intérieur du bâtiment concerné par l'accident et tenter de comprendre la cinétique et les causes des explosions. Le SDIS, l'inspection des installations classées en charge du suivi du site, deux experts de l'INERIS, les polices judiciaires et scientifiques et l'OCLAESP étaient présents lors de cette seconde journée sur site.

Ils ont pu visiter les installations sinistrées qui avait été mises en sécurité pour permettre les expertises.

Il a été possible d'échanger sur le fonctionnement du site et son activité, de préciser la chronologie de l'intervention le jour du sinistre, de visiter le bâtiment et de constater les dégâts occasionnés.

IV.2 Intervention de l'inspection des installations classées

L'inspection des installations classées a fait part aux enquêteurs des éléments dont elle avait connaissance en matière d'exploitation et de suivi de ce site.

Au-delà des mesures d'urgence prises par l'inspection des installations classées à l'issue des premières visites de site après l'accident, et citées en début de rapport, deux autres arrêtés préfectoraux ont été pris dans les mois qui ont suivi l'accident :

- L'arrêté préfectoral de mise en demeure du 14 octobre 2022 visait les points qui semblaient avoir contribué à l'accident, à savoir le défaut de nettoyage et la conservation d'un équipement inutilisé ;
- L'arrêté préfectoral complémentaire du 8 novembre 2022 est venu modifier l'arrêté préfectoral de mesures d'urgence concernant les conditions de reprise de l'activité.

IV.3 Expertise de l'INERIS

Deux experts de l'INERIS, spécialisés dans le domaine de la pyrotechnie et de la résistance des structures aux explosions, ont accompagné les inspecteurs du BEA-RI sur site afin de les appuyer dans la compréhension du phénomène survenu et des effets qui en ont résulté.

Les experts de l'INERIS ont dû se déplacer une seconde fois sur site, le mercredi 17 août, pour réaliser des prélèvements de la nitrocellulose encore présente au sein du bâtiment sinistré.

³ Office central de lutte contre les atteintes à l'environnement et à la santé publique

Dans la continuité des constats conjoints dressés lors de ces différentes visites, le BEA-RI a mandaté l'expertise de l'INERIS sur les points suivants :

- Estimer la quantité de nitrocellulose énergétique nécessaire au regard des dégâts visuels constatés sur les plans bâtiminaire, en intégrant les effets missiles des projectiles retrouvés aux abords du bâtiment concerné, et de la surpression engendrée par les dégâts causés en équivalent TNT ;
- Définir la sensibilité en fonction du mode de séchage, au choc, friction et à la température de la nitrocellulose énergétique par des essais ou via la bibliographie, notamment au vue des conditions météo ayant précédé l'accident ;
- Déterminer si le contact de nitrocellulose énergétique avec du butanol fort (inscription présente sur la cuve eaux blanches nouvellement installée) peut conduire à une réaction exothermique ;
- Déterminer si le contact de nitrocellulose énergétique avec le produit cuivré graisseux retrouvé sur site peut conduire à une réaction exothermique.

Le rapport établi par l'INERIS a été rendu au BEA-RI le 10 août 2023. Il est joint en annexe du rapport d'enquête.

V. Déroulement de l'évènement

V.1 Déclenchement de l'évènement

Le mercredi 3 août 2022 vers 13h50, alors que l'activité de production au sein du bâtiment est à l'arrêt depuis le 25 juin pour laisser place aux travaux de maintenance annuelle, des ouvriers de plusieurs entreprises sous-traitantes travaillent sur différents chantiers.

Plusieurs interventions étaient en cours au moment de l'accident à l'intérieur du bâtiment :

- En partie nord du bâtiment, le remplacement d'une cuve de récupération des eaux blanches et le raccordement des canalisations de cette dernière. Il s'agissait d'une opération de raccordement mécanique, c'est-à-dire bride à bride avec raccords à boulons ;
- Le remplacement des tresses⁴ des 4 bacs relais au rez-de-chaussée permettant l'étanchéité de ces derniers ;
- Le remplacement de tresses sur tête des raffineurs. La semaine précédente, tous les carters avaient été retirés ainsi que les tresses, et les ouvriers procédaient au remontage avec des joints neufs ;
- Une intervention sur le raffineur 1, situé au plus près des anciennes cuves eaux blanches ayant totalement explosé. L'opération consistait à resserrer les cosses électriques de l'appareil.

Ces interventions se réalisaient sans outillage électrique, hormis le chantier de remplacement de la cuve pour lequel l'utilisation d'une clé à choc à alimentation autonome était prévue. Les appareils de production étaient hors tension (consignés).

⁴ Les tresses permettent d'assurer l'étanchéité et correspondent à des joints.

Les travaux de remplacement de la cuve eaux blanches, étaient planifiés sur une période de 3 semaines, de fin juillet à la mi-août 2022 :

- La cuve à installer, qui était une cuve de récupération stockée sur le site de MANUCO depuis plusieurs années, a tout d'abord été récupérée début juillet par la société sous-traitante 1 pour être transformée et préparée ;
- La première semaine de la période de maintenance (25 au 29 juillet), une autre société sous-traitante appelée 2 dans le présent rapport, a déposé les anciennes tuyauteries. N'ayant pas rencontré de difficultés, elle a réalisé ces opérations en 4 jours. Une semaine était planifiée pour réaliser ce travail ;
- Le mardi 2 août au matin, la découpe des canalisations et des pieds de l'ancienne cuve avait eu lieu avant qu'elle soit sortie des locaux au moyen d'une grue de levage. Du fait des actions de découpage et de manutention, cette opération avait été identifiée comme la plus à risque ;
- La nouvelle cuve transformée a été mise en place le mardi 2 août après-midi ;
- Le mercredi 3 août après-midi, deux ouvriers de l'entreprise sous-traitante 1 raccordent les canalisations de la nouvelle cuve eaux blanches et un personnel de MANUCO surveille l'opération. C'est durant cette étape que l'accident survient. Les personnels de la société sous-traitante 1 avaient reçu un accueil sécurité préalablement à l'intervention et signé un permis de travail indiquant le risque de présence de nitrocellulose et l'application des mesures de sécurité à adopter (travail sous eau, arrosage continu, sol et équipement mouillés en permanence).

Un employé de la société sous-traitante 1, positionné en haut d'un escabeau pour pouvoir raccorder l'ancienne et la nouvelle tuyauterie au moyen de brides à écrous, utilise alors une clé à chocs afin de terminer le serrage des boulons.

Son autre collègue se dirigeait à ce moment-là vers l'extérieur du bâtiment par la porte située à l'entrée nord afin d'aller chercher du matériel dans leur camion stationné à proximité.

Une première explosion est survenue à cet instant, projetant les ouvriers au sol et soufflant une partie du mur en brique latéral situé à proximité.

V.2 La succession d'explosions

En moins d'une minute, quatre explosions⁵ seront ressenties d'après les témoignages recueillis, espacées de 10 à 20 secondes chacune, en se déplaçant vers le mur opposé (au sud), sur la largeur du bâtiment, et soufflant au fur et à mesure les canalisations de l'atelier et différents outils de production, une partie de la toiture et certaines parties des murs du bâtiment.

Au moment de l'explosion :

- 3 ouvriers de la société sous-traitante 2 intervenaient sur le raffineur 4 alors qu'un autre personnel de MANUCO resserrait les cosses du bornier du raffineur 1 ;
- Un dernier ouvrier de la société sous-traitante 2 travaillait sur l'un des bacs relais situé à quelques mètres du raffineur 4.

⁵ Le nombre d'explosions a pu être plus important, comme l'indique l'INERIS dans son rapport, car les bruits ont pu se confondre lors de la cinétique rapide du phénomène.

D'après les témoignages recueillis, vu de l'extérieur, la seconde explosion libère une forte surpression qui déforme le bâtiment, qui semble gonfler sous l'effet de souffle. La troisième explosion est perçue comme la plus violente et souffle la toiture du bâtiment.

C'est à l'issue de la quatrième et dernière explosion entendue, que les observateurs extérieurs apercevront un début d'incendie puis rapidement des flammes et de la fumée sortant du bâtiment.

Durant ce temps, la majorité des ouvriers évacuent l'atelier dans la direction opposée à l'explosion initiale. Ils sont cependant rattrapés par les explosions successives qui se dirigent du nord vers le sud.

Ceux qui arrivent à sortir sont rassemblés au niveau d'un bâtiment situé à proximité, et sont pris en charge par un responsable de MANUCO. L'un des ouvriers est gravement blessé.

Le BEA-RI n'a pu établir la succession d'explosions que d'après les témoignages recueillis.

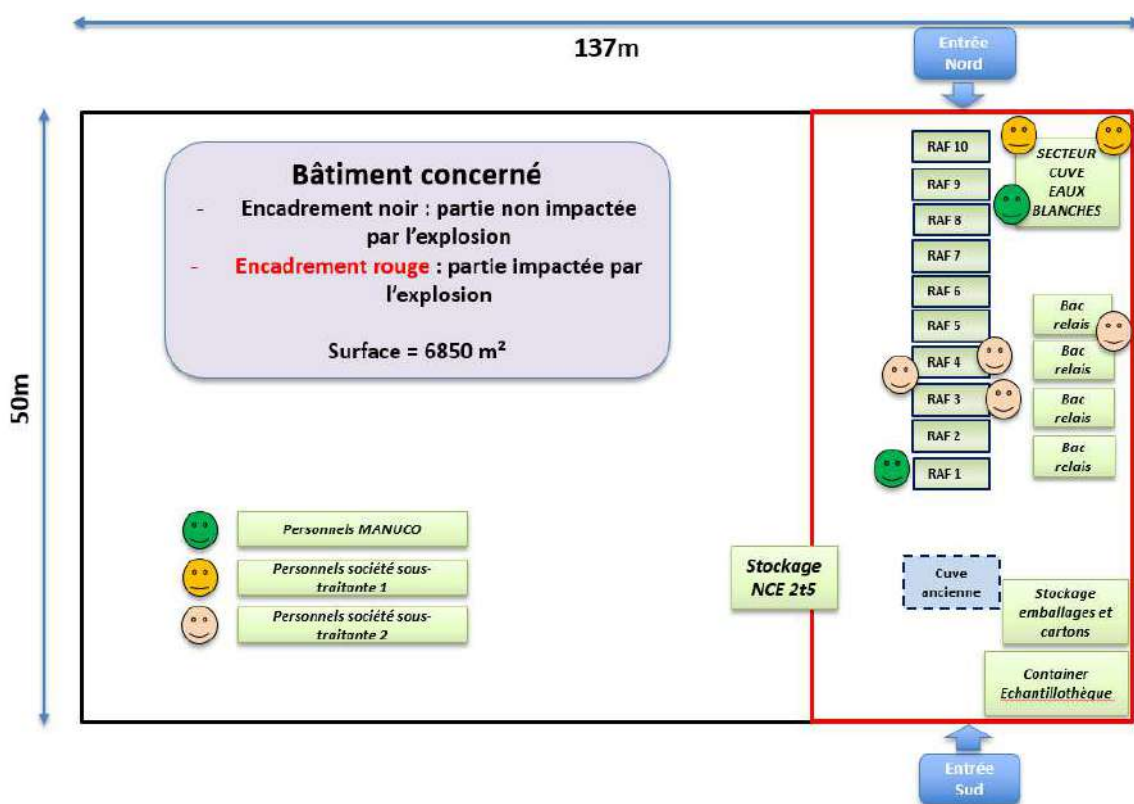


Figure 4 : Positionnement des différents opérateurs au moment de la première explosion (Source BEA-RI)

V.3 L'intervention des secours publics

Le centre de traitement des appels des sapeurs-pompiers reçoit l'alerte le 3 août à 13h50 et engage les premiers moyens à 13h53.

Les principales actions des sapeurs-pompiers ont été de prendre en charge les blessés, de rechercher l'ouvrier manquant à l'appel, d'attaquer le sinistre afin de limiter la propagation aux bâtiments adjacents, dont l'un contenait un stockage de 8 tonnes d'huile et de réaliser un périmètre de sécurité au vu du caractère explosif de la nitrocellulose.

L'incendie sera considéré comme éteint à 18h48 et l'intervention terminée à 22h55.

VI. Conclusions sur le scénario de l'événement

VI.1 Le scénario

L'explosion initiale s'est produite au moment du raccordement de l'une des nouvelles canalisations « eaux blanches » à l'ancienne canalisation qui avait été découpée la semaine précédente.

Ce raccordement était réalisé en hauteur à l'aide d'un escabeau, par un ouvrier de la société sous-traitante 1, qui tenait la canalisation à raccorder en équilibre sur son épaule. L'ouvrier était déjà intervenu chez MANUCO mais ne connaissait pas ce bâtiment avant ces travaux.

Les deux canalisations se sont entrechoquées plusieurs fois avant de faire coïncider les deux brides. Afin de visser les brides entre elles, l'opérateur a utilisé une clé à chocs, outil électroportatif. L'ensemble des témoignages indiquent que la première explosion a eu lieu durant cette opération et à cet endroit.

L'analyse des résidus présents dans les canalisations (cf. annexe I) a permis d'établir qu'il s'agissait de nitrocellulose qui n'avait pas été évacuée lors des procédures de rinçage avant travaux et qui, du fait de la vague de chaleur que connaissait la région, se trouvait un état de séchage avancé.

Du fait de la grande réactivité de la nitrocellulose, due notamment aux conditions de séchage, il est possible que l'échauffement d'un des boulons en cours de serrage (grippage) puisse être à l'origine de l'échauffement générateur de l'inflammation de la nitrocellulose, et par effet mèche, de la première explosion survenue quelques mètres plus loin dans la canalisation.

L'opérateur de MANUCO, qui était présent en surveillance à quelques mètres, a vu une flamme mais n'a pas eu le temps de prendre le tuyau d'arrosage posé au sol et s'est retrouvé projeté à terre par l'explosion.



Photo 1 : Zone d'échauffement à l'origine de l'explosion initiale, avec vue de la nouvelle cuve eaux blanches qui était en cours de raccordement

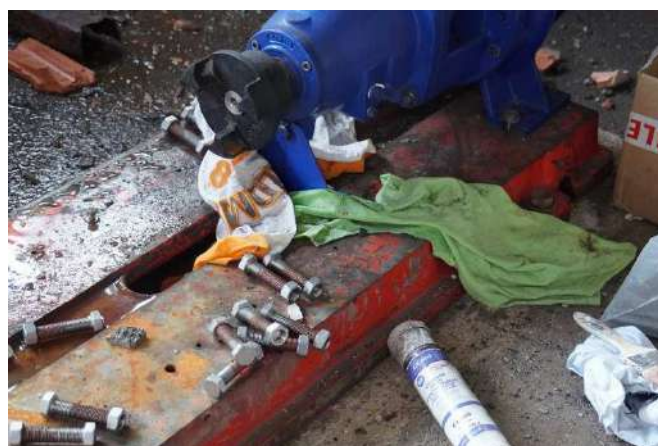


Photo 2 : Boulons retrouvés à proximité qui servaient à raccorder les deux brides entre elles.



Photos 3 et 4 : Vue rapprochée des 2 tuyauteries en cours de raccordement avec les boulons manquants

À l'issue de cette première explosion, 3 autres seront perçues par les témoins. L'analyse approfondie mettra en avant d'autres points présentant des dégâts. Le scénario de propagation des explosions et leur chronologie n'ont pu être déterminés avec exactitude. Néanmoins, les témoignages et les éléments relevés sur place permettent d'envisager deux modes de propagation des explosions.

Le premier consiste à l'explosion par sympathie et/ou par transmission de l'onde de chaleur au sein des tuyauteries où vont se succéder des périodes de combustion plus ou moins rapides et des déflagrations/détonations.

Le second mode de propagation serait lié à la projection de débris dont l'impact serait suffisant pour échauffer de la nitrocellulose et en fonction des conditions, cette combustion pourrait évoluer en déflagration/détonation.



Photo 5 : Projectile en acier retrouvé à plus de 30 mètres du bâtiment

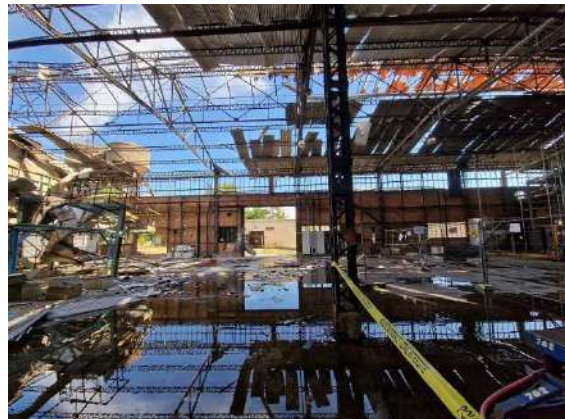




Photo 6 : Vue des dégâts du bâtiment avec vision de la façade intérieure côté Sud

| | |
|--|---|
|  |  |
| <p>Photo 7 : Vue de l'intérieur du container maritime qui présente des déformations globales de l'ensemble des parois.</p> | <p>Photo 8 : Impact d'un effet missile sur la porte du container ayant traversé celle-ci.</p> |

L'événement initiateur est donc un choc ou un échauffement de la nitrocellulose séchée contenue dans une canalisation d'eaux blanches lors d'une opération de maintenance. Cet événement initie une propagation à divers équipements qui contiennent également des restes de nitrocellulose sèche.

Dans un second temps, une « échantilloteque » contenant des centaines d'échantillons (sous eau) totalisant plusieurs centaines de kilos de nitrocellulose était présente dans l'angle Sud du bâtiment au sein d'un container maritime. Un petit local de stockage contenant des saches plastiques et des étiquettes, qui ont contribué à l'apport de combustible pour l'incendie, était situé juste à côté du container maritime.

| | |
|---|---|
|  |  |
| <p>Photo 9 : A droite, le container maritime qui servait « d'échantilloteque » et à gauche, un local de stockage des emballages et étiquettes des produits.</p> | <p>Photo 10 : Vue du local de stockage des saches plastiques et étiquettes après l'incendie</p> |

VI.2 Analyse de l'INERIS

Dans un premier temps, un contenant de graisse cuivrée a été retrouvé à l'endroit du raccordement des canalisations. Il a été demandé à l'INERIS de vérifier si la réaction entre la nitrocellulose et la graisse cuivrée avait pu être l'élément amorceur. Les études bibliographiques n'ont pas déterminé d'influence significative à court terme de ce produit sur la nitrocellulose.

| | |
|---|--|
|  |  |
| <p>Photo 11 : Graisse cuivrée retrouvée à proximité du point d'origine de l'explosion</p> | <p>Photo 12 : Joint de la bride de liaison des canalisations</p> |

La cuve « eaux blanches » qui était en cours de remplacement, contenait une inscription « butanol fort » sur sa face extérieure. De la même manière, il n'a pas été démontré d'incompatibilité entre ce type de produit et la nitrocellulose, écartant de fait un mélange de produit incompatible ayant pu initier la réaction.

La température d'auto-inflammation de la nitrocellulose énergétique connue par la majorité des employés interrogés de MANUCO était d'environ 170°C. Cette température est celle déterminée par le laboratoire interne de l'entreprise dans le cadre des essais clients du produit fini et vendu.

Les différentes recherches bibliographiques réalisées par l'INERIS ont démontré que la nitrocellulose avait :

- Une faible sensibilité à la friction ;
- Une forte sensibilité à l'impact ;
- Et concernant la sensibilité thermique, l'évaporation de l'eau ainsi que le temps de séchage ont un effet déstabilisant en réduisant l'énergie nécessaire pour atteindre un échauffement auto-entretenu de la nitrocellulose.

| Températures recommandées de ne pas dépasser pour du stockage de nitrocellulose (NC) | | | |
|--|----------|--------------|------------------|
| NC seule | NC + eau | NC + éthanol | NC + Isopropanol |
| 54,5°C | 45,1°C | 47,2°C | 50,4°C |

Ces données indiquent que la nitrocellulose ayant séché après mouillage à l'eau peut s'enflammer dès que les températures extérieures sont supérieures à 45°C. Les conditions de séchage lent sous eau / acide sont les plus déstabilisantes pour la nitrocellulose.

A partir des éléments du rapport de l'INERIS et des constatations réalisées, il est probable que la propagation du phénomène se soit produite par différents moyens :

- Par effet « missiles » par percussion de différents équipements présents dans l'atelier ;
- Par propagation de l'onde de choc / chaleur au-travers des canalisations vides ;
- Par activation thermique des fines de nitrocellulose.

Un cumul de ces différents modes de transmission est fortement probable.

Dans un second temps, il a été demandé à l'INERIS de déterminer les quantités nécessaires de nitrocellulose ayant permis de produire les dégâts observés, en prenant en compte l'intensité des dégâts sur les matériaux et les équipements, les distances de projection des effets missiles, les bris de vitres et ceci, selon différents scénarii possibles de lieux d'accumulation de la nitrocellulose.

Les conclusions de l'INERIS conduisent à arrêter des quantités de nitrocellulose équivalentes à environ 0,6 à 1,8 kg (selon la nature du produit : dense ou en fibres peu denses) qui auraient pu réagir par déflagration/détonation dans les tronçons de canalisation DN150 en acier et DN200 en PVC.

Une quantité de nitrocellulose de l'ordre de 1 kg serait susceptible d'avoir réagi quant à elle dans la cuve abandonnée ayant généré l'explosion la plus importante.

Les conditions de température et d'humidité avant et pendant l'accident vont dans le sens d'une nitrocellulose fortement déstabilisée, en sachant que des quantités non négligeables de nitrocellulose étaient présentes dans des réseaux d'eaux filtrées.

Les analyses détaillées de l'INERIS sont consultables dans le rapport annexé au présent document.

VII. Facteurs contributifs

On peut noter différents facteurs ayant contribué à la survenue de la situation rencontrée et aux dégâts occasionnés :

VII.1 Les équipements abandonnés

La présence d'équipements ou de canalisations anciennes qui ne sont plus utilisés dans le process, parfois depuis de nombreuses années, a contribué à la propagation de la première explosion au sein de l'atelier de fabrication.

La présence de ces équipements semble être caractérisée par deux raisons principales :

- Une culture de conservation de l'entreprise dans l'éventualité d'une ré-utilisation ultérieure ;
- Le coût du démantèlement lié à la difficulté de décontamination de la nitrocellulose et à la nécessité d'arrêter la production durant la période nécessaire à ces travaux.

Ces équipements et canalisations inutilisés et sans eau contenaient des fines de nitrocellulose séchées avec le temps, aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur de ces derniers et continuaient à être contaminés par les poussières de nitrocellulose qui se déposaient quotidiennement.

La troisième explosion survenue lors de l'accident fût la plus violente, et a été localisée au niveau d'un ancien équipement, imposant, totalisant environ 12m². Cet équipement n'était plus utilisé depuis plus d'une quinzaine d'années. Cette cuve à ciel ouvert, reposant à 2,20m de hauteur par rapport au sol, mesurait 3,90m de longueur par 3m de largeur pour 1,60m de hauteur. Elle possédait une épaisseur de 3mm et servait à séparer par décantation la nitrocellulose des eaux blanches. Elle avait été déconnectée du process et arrosée pour la dernière fois il y a plusieurs années d'après les témoignages recueillis. Elle n'était pas nettoyée régulièrement depuis.

Les fines de nitrocellulose se sont ainsi accumulées durant ces nombreuses années à l'intérieur de celle-ci, et ont séché naturellement. Ces conditions de séchage dans l'atelier ont été accentuées durant la période caniculaire de cet été 2022.



On peut noter également que les équipements et canalisations en acier ont constitué de véritables projectiles acérés au moment des différentes explosions. Nous avons pu constater des chemins de câbles tranchés en deux ou des murs de l'atelier criblés d'impacts par exemple. Les conséquences auraient pu être plus graves si ces pièces métalliques avaient atteint les parties vitales des ouvriers présents.



Photo 15 : Chemin de câbles tranché par un projectile avec impact dans le mur



Photo 16 : Impacts d'éclats métalliques dans un des murs du bâtiment

VII.2 Les procédures de nettoyage des installations

VII.2.1 Nettoyage interne des canalisations

Lorsque le process est en fonctionnement, l'eau circulant dans les canalisations supprime le risque d'auto-inflammation du produit. Le niveau de risque n'est plus le même lorsque les installations sont en maintenance et que les canalisations ne sont plus en eau.

Or, avec le temps, des microcavités et des dépôts de rouille (oxydes de fer) se créent à l'intérieur des canalisations en acier dans lesquelles circulent les eaux blanches. Ces microcavités et cette couche de rouille piègent la nitrocellulose qui n'est ainsi pas évacuée lors des opérations de rinçage, lors de la mise hors eau des équipements.



Photo 17 : Reste de nitrocellulose présent dans les canalisations de transport des eaux blanches



Photo 18 : État intérieur d'une canalisation PVC transportant des eaux blanches

| | |
|--|--|
|  |  |
| <p>Photo 19 : État intérieur d'une canalisation acier transportant des eaux blanches après l'explosion</p> | <p>Photo 20 : État intérieur d'une canalisation PVC transportant des eaux blanches</p> |

Les procédures internes prévoient en effet de rincer les canalisations à l'eau sans pression jusqu'à ce que l'eau soit claire et ne présente plus d'aspect pâteux ou chargé. Ce procédé est insuffisant pour retirer la totalité de la nitrocellulose piégée dans les microcavités ou les résidus de rouille mais également dans les longues canalisations en PVC ou en acier inoxydable, qui sont néanmoins moins exposées à ce risque.

Plusieurs facteurs ont amplifié le risque et conduit à l'accident :

- La longue période d'arrêt du process entre la fin du mois de juin et la fin du mois de juillet ;
- Les conditions de température caniculaires les dernières semaines précédant les travaux qui ont contribué à abaisser le taux d'humidité de la nitrocellulose présente dans les canalisations en travaux. Des quantités importantes de nitrocellulose ont été observées sur les canalisations non détruites par les explosions comme le montrent les photos, ce qui soulève des questionnements relatifs à la méthodologie de nettoyage de ces dernières avant travaux ;
- L'absence de mouillage de l'intérieur de la conduite.

VII.2.2 Nettoyage des fines dans l'atelier

Les fines de nitrocellulose se déposent partout et les opérateurs mènent un combat permanent pour les éliminer et maintenir l'atelier en sécurité. La principale mesure de sécurité consistait à mouiller les sols afin d'éviter un allumage (un blocage de roue d'un chariot à titre d'exemple, pouvant générer un échauffement suffisant). De même les fines s'accumulent également dans toutes les parties difficilement accessibles.

Des analyses de risques sont réalisées par MANUCO en amont de travaux à venir, qui prévoit systématiquement le travail sous eau en cas de présence de nitrocellulose. Cependant, d'après les témoignages recueillis et la situation rencontrée lors de cet accident, seuls les sols étaient régulièrement arrosés.

VII.3 Le rôle des personnels de MANUCO durant les travaux de maintenance

Durant les travaux de maintenance, des employés de MANUCO étaient présents sur la zone des travaux auprès des entreprises sous-traitantes. Au-delà des responsables maintenance, HSE, ou encore des chefs d'atelier ou d'équipe, qui passaient sur le chantier de façon occasionnelle et/ou aléatoire, les personnels de MANUCO présents en permanence étaient souvent des opérateurs certes qualifiés mais embauchés depuis moins d'un an et donc disposant d'une expérience limitée.

L'intitulé du poste occupé par ces derniers était « surveillant » et ils avaient deux objectifs :

- Intervenir à l'aide d'un tuyau d'arrosage à proximité en cas d'incendie de fines de nitrocellulose ;
- S'assurer que l'environnement de travail était dégagé et correct pour les travaux.

Aussi, leur rôle d'encadrement vis-à-vis des sous-traitants était limité.

Bien que les sous-traitants aient été informés des risques et des actions de prévention à mettre en œuvre par le biais du permis de travail et de l'analyse des risques, un arrosage continu d'une canalisation en hauteur, et tout particulièrement de l'intérieur, tout en réalisant des actions de raccordement, semble difficile à réaliser. Le surveillant de MANUCO, situé à quelques mètres des travaux, n'est pas intervenu pour corriger les pratiques mises en œuvre. La méconnaissance des risques ou encore la difficulté d'application des mesures préconisées peuvent donc être soulevés, car les prescriptions du permis de travail sur l'arrosage n'ont pas été respectées par les sous-traitants ni remise en cause par les différents personnels de MANUCO présents à différents moments de la journée dans l'atelier.

VII.4 Les conditions de travail et le sentiment des intervenants vis-à-vis du risque

Le planning des actions de maintenance à réaliser sur ces trois semaines était chargé car il y avait beaucoup de chantiers à gérer sur le site et des travaux se sont ajoutés au fur et à mesure, sans augmenter la période de temps pour les réaliser.

Plusieurs incidents mettant en jeu la sécurité avaient eu lieu lors de la première semaine de travail au sein des sous-traitants présents sur le secteur « Acide », ce qui avait conduit à un arrêt des chantiers afin de refaire un point relatif à la sécurité.

Les fortes températures de cet été 2022 compliquaient également le respect du calendrier de maintenance car elles mettaient les ouvriers à l'épreuve et les horaires de travail avaient été adaptés au mieux de ce qui pouvait être fait dans le cadre d'un plan fortes chaleurs (l'entreprise EURENCO ne pouvait débuter toute activité sur le site avant 6h du matin).

Ces conditions et cette charge de travail importante dans des délais contraints avaient été remontées à la direction du site. Cependant, l'atelier du bâtiment concerné n'étant pas considéré comme le plus sensible des chantiers et la reprise de la production devant avoir lieu au milieu du mois d'août, il était impératif que ces travaux soient réalisés dans les délais impartis.

VII.5 L'absence de notion de dangerosité du bâtiment et des opérations

Le bâtiment concerné n'était ni situé en zone pyrotechnique ni classé ATEX, ce dernier ne contribuant pas à produire des atmosphères explosibles.

De plus, en période normale de fonctionnement, il n'y a pas ou peu de nitrocellulose sèche présente dans les différents procédés de fabrication à cet endroit du site, les canalisations de transport étant remplies en eau.

Cependant, ceci n'est plus le cas durant la période de maintenance car les canalisations des eaux blanches n'étaient plus alimentées en eau.

Bien que les canalisations aient été rincées à l'eau selon une procédure établie, des résidus de nitrocellulose, parfois en quantité importante, restent présents dans les canalisations asséchées, notamment piégés dans les microcavités et par les dépôts de rouille s'étant formés dans les canalisations acier particulièrement.

D'après les témoignages recueillis, les travaux qui étaient en cours dans le bâtiment concerné n'étaient pas considérés comme les plus sensibles au regard des autres chantiers sur le site (tels que le « parc acides » et la nitruration), notamment depuis que les canalisations de raccordement de la cuve eaux blanches avaient été découpées, ce qui semblait constituer la phase la plus dangereuse de ce chantier.

Les entretiens menés par le BEA-RI ont montré que les personnels d'encadrement avaient connaissance que les températures d'amorçage de la nitrocellulose séchée à l'air libre étaient basses mais sans connaître précisément ces valeurs. Les personnels de l'entreprise sont bien entendu sensibilisés aux dangers générés par la nitrocellulose et l'incidence de la température extérieure sur les conditions de stockage. La température d'auto-inflammation du produit fini, à la connaissance de la majorité des personnels interrogés, était élevée (entre 100 et 170°C). Elle correspondait à la température déterminée par le laboratoire interne de l'entreprise dans le cadre des essais clients du produit fini et vendu.

Or, la nitrocellulose est un matériau énergétique qui peut également s'auto-échauffer : la nitrocellulose se décompose naturellement très faiblement à température ambiante mais cette décomposition s'accélère si la température ambiante augmente, et si le volume augmente (phénomène présent pour le charbon et les peroxydes par exemple).

Les recherches bibliographiques de l'INERIS concernant les limites de stockage de la nitrocellulose ayant séché à l'air libre ont montré que la température de décomposition accélérée se situe autour de 45°C dans des conditions déstabilisantes, comme du séchage lent de plusieurs jours et la multiplicité des cycles de mouillage/séchage. Ces conditions sont cohérentes avec l'épisode caniculaire de l'été 2022 et cette plage de température de 45°C est proche de la valeur de 38°C relevée dans l'air (et à l'ombre) le jour de l'accident.

Ces différents éléments conduisent à un sentiment de manque de conscience globale de la chaîne hiérarchique de l'entreprise des dangers générés par la nitrocellulose dans le cas d'un séchage à l'air libre :

- De sa température de décomposition accélérée, proche des températures caniculaires ayant sévi sur le territoire à cette période ;
- Des quantités nécessaires finalement peu importantes comme cela a été relevé par l'INERIS, permettant de générer les effets constatés.

De plus, le fait que le bâtiment n'était pas celui considéré comme le plus à risque d'après les témoignages recueillis de l'ensemble des parties, et les travaux considérés comme les plus sensibles ayant été réalisés la veille, ont pu également contribuer à une baisse de vigilance concernant la sécurité nécessaire en présence de nitrocellulose séchée à l'air libre dans les conditions de température que nous connaissions à cette période.

VII.6 Les températures caniculaires sévissant depuis plusieurs jours

Bien que ce facteur a déjà été soulevé plus haut, il est nécessaire d'insister sur les relevés de températures de météo France durant le mois précédent l'accident, qui font état de températures caniculaires (dépassant parfois 40°C). Les conditions de travail sous équipement individuel de protection devenaient de plus en plus difficiles durant cette période à cause des températures journalières. Ces conditions peuvent contribuer à abaisser le niveau de protection ou diminuer le niveau de vigilance.

Les horaires de travail avaient été modifiés en débutant plus tôt le matin mais les horaires d'ouverture du site d'EURENCO limitaient cette flexibilité.

La longue période d'arrêt des installations semble avoir contribué à assécher les résidus de nitrocellulose permettant d'amorcer la réaction de combustion, les températures étant très proches des valeurs mentionnées par l'INERIS dans son rapport et issues de la littérature scientifique.

VII.7 Les stockages de produits finis dans l'atelier

Le BEA-RI a enfin constaté la présence de 2,6 tonnes de nitrocellulose conditionnés en fûts craft et en fûts métalliques (produit fini) qui se trouvaient dans le bâtiment à proximité de la partie où se sont produites les explosions. Cette nitrocellulose était stockée à un taux d'humidité suffisant et ce stockage a été atteint par un éclat lors de l'explosion sans réagir.

En effet, lorsque MANUCO lance une session de fabrication de nitrocellulose, elle ne possède pas la capacité de réaliser celle-ci à 100 kilos près. L'entreprise ne livre au client que des palettes entières de produit fini et il reste alors des reliquats de production.

De plus, lors de la fin d'une production, les opérateurs font tomber des galettes de nitrocellulose qui restent collées dans lesessoreuses. Ces reliquats étaient ainsi stockés dans le bâtiment concerné en attendant de repasser dans le process.

Il est légitime de s'interroger sur les conséquences supplémentaires qu'il y aurait pu avoir si ce stockage avait participé par effet domino à l'explosion. Ces fûts ont été évacués vers l'entrepôt de stockage le lundi 8 août afin de contribuer à la sécurisation du bâtiment post-accident et ce, d'autant que la nitrocellulose présente dans l'échantillothèque était stockée dans les mêmes conditions d'humidité et a réagi.



Photos 21 et 22 : Stockage de 2,6 t de nitrocellulose présent dans la zone d'explosion du bâtiment.

VIII. Enseignements de sécurité

VIII.1 La suppression des matériels abandonnés

La présence de matériel abandonné dans l'atelier a conduit notamment à l'explosion la plus violente. L'analyse a posteriori a montré que le matériel qui a explosé n'était pas le seul inutilisé à être présent dans l'atelier. Ces matériels, même lorsqu'ils font l'objet d'un nettoyage lors de leur arrêt, sont à l'origine d'accumulation de poussières de nitrocellulose. Ils sont parfois encore raccordés aux circuits d'eaux blanches, ce qui complexifie inutilement la perception du fonctionnement de l'atelier pour les intervenants. L'arrêté préfectoral du 14 octobre 2022 avait déjà prescrit le retrait des matériels inutilisés dans le bâtiment concerné.

Leur retrait doit donc devenir une pratique systématique. En complément, une procédure de réexamen régulier, à minima annuelle, des matériels inutilisés (équipements en test non concluant, modifications temporaires de process, etc) doit être mise en place afin de vérifier que leur conservation en l'état reste nécessaire.

VIII.2 Améliorer le process de nettoyage de l'atelier

Nous avons pu constater de nombreux dépôts de nitrocellulose dans les canalisations et appareils présents dans le bâtiment.

Les canalisations en acier utilisées pour le transport des eaux blanches facilitent d'autant plus ces dépôts lorsqu'elles sont atteintes par la rouille et que des microcavités apparaissent avec le temps.

Le BEA-RI a constaté que de nombreuses canalisations possédaient peu de pente permettant un écoulement gravitaire efficace. Des pentes plus adaptées doivent permettre d'améliorer la vidange complète des canalisations.

Ces dépôts de nitrocellulose deviennent dangereux lorsque la canalisation n'est plus alimentée en eau comme c'est le cas lors des phases de maintenance, et les conditions de séchage, comme l'a relevé l'INERIS, font diminuer la température de décomposition auto-accélérée.

Les constatations réalisées amènent à préconiser un nettoyage à l'eau sous pression des canalisations avant les opérations de maintenance afin de déloger plus efficacement la nitrocellulose piégée dans ces dernières. L'utilisation d'acier inoxydable en lieu et place d'acier au carbone est à privilégier au vue des phénomènes de piégeage constatés sur l'acier au carbone.

Enfin, lorsque cela est possible, l'utilisation de canalisations en PE (polyéthylène) ou en PVC non seulement évitent comme dans le cas de l'acier inoxydable les dépôts mais également diminuent les blessures éventuelles pouvant être provoquées par les effets missiles des pièces métalliques projetées lors d'une explosion.

VIII.3 La prévention des risques lors des opérations de maintenance

La mise hors eau du circuit des eaux blanches rend les opérations de maintenance sur ces circuits doublement dangereux. Tout d'abord, les conditions de séchage de la nitrocellulose contenue dans ces circuits la rendent particulièrement sensible (cf. analyse INERIS) et d'autre part, la configuration même du circuit de transport et ses matériaux constitutifs tend à créer des dépôts de nitrocellulose susceptible de réagir.

Dans ce contexte, un atelier, et surtout un circuit de canalisations permettant la circulation du produit, qui, en fonctionnement normal, présente un risque faible, se révèle dans les phases d'entretien plus risqué.

Les opérations de maintenance doivent donc, dans ce cadre, faire l'objet d'une étude particulière, tant dans l'analyse des méthodes de maintenance que de la surveillance lors de l'exécution. Ces études doivent être tracées dans les documents de maintenance mais également dans ceux établis au titre de la protection des travailleurs. Il convient de renforcer le respect des procédures existantes par les sous-traitants et de mettre à disposition de ces derniers les moyens d'arrosage adaptés aux situations rencontrées, notamment lors de travail en hauteur.

VIII.4 L'information des intervenants

Du fait des conditions de séchage, la nitrocellulose présente lors des opérations de maintenance a des caractéristiques de stabilité différentes du produit fini, notamment en matière de stabilité thermique et de température de décomposition accélérée.

Les enquêteurs du BEA-RI ayant constaté que la quasi-totalité des intervenants n'en n'avait pas conscience, une information de l'ensemble des intervenants sur ces caractéristiques semble nécessaire.

Dans un second temps, les ouvriers des entreprises sous-traitantes ne semblaient pas disposer d'une connaissance accrue du site, cette dernière se limitant à une information des process sur leur seule zone d'intervention. Cette absence de formation globale sur les différentes zones du site et leurs spécificités pourraient être préjudiciable lors de la survenue d'un accident majeur.

VIII.5 Anticiper le réchauffement climatique sur les périodes de maintenance

Les effets du réchauffement climatique devant s'accroître dans les années à venir et notamment la récurrence d'épisodes caniculaires, une réflexion doit être menée concernant l'adaptation des processus de maintenance à ces fortes chaleurs voire le décalage des périodes de maintenance hors des périodes caniculaires pour les installations qui présentent des risques d'auto-inflammation ou d'auto-décomposition à des températures proches de celles susceptibles d'être atteintes.

IX. Recommandations de sécurité

IX.1 À destination de l'exploitant

IX.1.1 Au plan technique

Le BEA-RI recommande de :

- **Retirer et décontaminer les équipements, matériels et canalisations abandonnés dans le cadre du process** pour éviter tous risques de dépôt de poussières de nitrocellulose **et de mettre en place une procédure de gestion des appareils inutilisés ;**
- **Intégrer les contraintes de nettoyage dans la conception des canalisations et des équipements afin de réduire le phénomène de dépôt de nitrocellulose ;**
- **De réduire au maximum le stockage de produits finis et de déchets dans le bâtiment concerné en privilégiant les zones de stockage dévolues à cet effet.**

IX.1.2 Au plan organisationnel

Le BEA-RI recommande de :

- **Renforcer la préparation des interventions hors d'eau** sur la base d'une analyse de risque qui identifie les mesures techniques et organisationnelles à mettre en œuvre (durée de l'intervention, modalités de nettoyage et de consignation des installations, mesures de prévention ou mesures compensatoires, définition de la mission de surveillant, ...) pour garantir la sécurité des opérateurs et des installations ;
- **Inclure dans les procédures de consignation, la vérification croisée entre la maintenance et la production, de l'état de nettoyage des circuits consignés ;**
- **Conduire une réflexion sur les risques nouveaux induits par le changement climatique**, et en particulier le phénomène de canicule, sur les activités du site et en vue d'adapter les pratiques et les consignes de sécurité ;
- **Renforcer la sensibilisation des intervenants (opérateurs et sous-traitants) sur l'incidence des conditions de séchage de la nitrocellulose vis-à-vis de sa stabilité**, notamment lorsque le séchage et/ou le taux d'humidité n'est pas contrôlé comme lors des opérations de maintenance ;
- **Renforcer la surveillance des sous-traitants afin de s'assurer du respect des consignes du permis de travail et sensibiliser les personnels de MANUCO quant aux responsabilités qui sont les leurs concernant la vigilance de l'application de ces consignes.**

X. Annexes

| | | |
|----------|------------------------------------|----|
| Annexe 1 | Rapport d'essais de l'INERIS | 33 |
|----------|------------------------------------|----|

Annexe 1 Rapport d'essais de l'INERIS



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 209316 - 2769588 - v3.0

14/11/2023

Appui à l'expertise de l'accident survenu dans un atelier de nitrocellulose exploitée par la société Manuco le 3 août 2022 à Bergerac (24)

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION GENERALE

Rédaction : LE-ROUX Benjamin - HEUDIER LAURE; PESSINA FLORENT

Vérification : CHAUMETTE SYLVAIN; LEPRETTE EMMANUEL; BODIN-REMOND SYLVIE

Approbation : Document approuvé le 14/11/2023 par BOUET REMY

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

| | |
|---|----|
| Glossaire | 6 |
| 1 Introduction | 7 |
| 1.1 Déontologie..... | 7 |
| 1.2 Contexte | 7 |
| 1.3 Visite et réunions d'échanges..... | 7 |
| 3 Description de l'installation concernée et informations sur l'événement | 8 |
| 3.1 Description générale du site et de l'installation concernée..... | 8 |
| 3.2 Description succincte de l'événement | 9 |
| 4 Réponses aux questions posées par le BEA-RI..... | 11 |
| 4.1 Question N°1 du BEA-RI - Estimation des quantités de nitrocellulose énergétique ayant pu réagir..... | 11 |
| 4.1.1 Synthèse des principaux dégâts de surpression ou projection de fragments sur les équipements du process et le bâtiment et estimation des lieux potentiels de décharge d'explosion | 11 |
| 4.1.2 Estimation de la quantité de nitrocellulose énergétique probable mise en jeu à différents endroits du process | 18 |
| 4.1.3 Estimation de la quantité de nitrocellulose énergétique dans la canalisation en acier reliant la cuve « eaux blanches » n°1 à l'épaississeur 3 | 23 |
| 4.1.4 Conclusion | 24 |
| 4.2 Question N°2 du BEA-RI - Etude de la sensibilité de la nitrocellulose énergétique | 24 |
| 4.2.1 Sensibilité aux stimuli mécaniques et stabilité thermique des résidus prélevés..... | 24 |
| 4.2.2 Impact du séchage de la NC sur sa stabilité et sensibilité..... | 28 |
| 4.3 Etude du contact de la nitrocellulose énergétique avec d'autres produits : butanol fort, produits cuivrés graisseux..... | 30 |
| 4.3.1 Question N°3 du BEA-RI | 30 |
| 4.3.2 Question N°4 du BEA-RI | 30 |
| 5 Conclusion..... | 31 |
| 6 Annexes..... | 32 |
| 7 Références | 33 |

Table des Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Bâtiment et zone de l'accident sur le process de raffinage (en rouge) | 8 |
| Figure 2 : Description de la chaine de raffinage du bâtiment, en respectant la disposition spatiale des éléments, le flux de circulation du mélange eau/NC. En Bleu le réseau d'eaux blanches non filtrées, et en Orange le réseau d'eaux blanches filtrées. | 9 |
| Figure 3 : Photo post accident de la canalisation en cours de raccordement | 10 |
| Figure 4 : Dégâts en façade Nord du bâtiment..... | 11 |
| Figure 5 : Dégâts en façade Sud du bâtiment..... | 12 |
| Figure 6 : Perforations du mur en briques..... | 12 |
| Figure 7 : Projection de fragments au Sud du bâtiment | 13 |
| Figure 8 : Projections de fragments..... | 13 |
| Figure 9 : Dégâts subis par la couverture de toiture – partie Nord..... | 13 |
| Figure 10 : Dégâts subis par la couverture de toiture – partie Sud | 14 |
| Figure 11 : Principaux dégâts liés aux effets de surpression ou de projection de fragments observés sur les équipements du process..... | 14 |
| Figure 12 : Principaux dégâts liés aux effets de surpression ou de projection de fragments observés sur les équipements du process – partie Est du bâtiment - vue du dessus | 15 |
| Figure 13 : Rupture de la canalisation DN150 reliant la cuve « eaux blanches » n°1 à l'épaisseur 3 | 15 |
| Figure 14 : Endommagement des battants et rupture de la vitre du bac de récupération 2 et rupture de la canalisation reliant ce bac aux tamiseurs | 16 |
| Figure 15 : Endommagement des tamiseurs et des canalisations acier, PVC associées..... | 16 |
| Figure 16 : Rupture sur tout le long de la canalisations PVC reliant les tamiseurs à la cuve « eaux blanches » n°2..... | 16 |
| Figure 17 : Rupture de la tuyauterie entre la cuve « eaux blanches » n°2 et le décanteur et perforation de celle-ci (à gauche) et déformation et nombreuses perforations du décanteur (à droite)..... | 17 |
| Figure 18 : Dommages subis par la cuve non raccordée | 17 |
| Figure 19 : Dommages subis par le container..... | 17 |
| Figure 20 : Lieux potentiels de décharge d'explosion – Bâtiment – partie Est vue du dessus..... | 18 |
| Figure 21 : Vitesse de détonation en fonction de la nature et de la densité de la nitrocellulose | 20 |
| Figure 22 : Emplacement des prélèvements 1, 2 et 3 | 25 |
| Figure 23 : Photo après prélèvement (1)..... | 25 |
| Figure 24 : Photo après prélèvement (2)..... | 26 |
| Figure 25 : Photo avant et après prélèvement (3) | 26 |
| Figure 26 : Emplacement du prélèvement 4..... | 27 |

Résumé

Ce rapport a pour objet de répondre à une sollicitation du BEA-RI faite à l'Ineris. Celui-ci concerne l'enquête sur un accident survenu dans un atelier de fabrication de nitrocellulose sur le site de la société Manuco, situé sur la commune de Bergerac (24), survenu le 03 août 2022.

L'objet de ce rapport consiste à répondre aux questions posées par le BEA-RI relatives à :

- L'estimation des niveaux de surpression, de la masse équivalente de TNT et de la quantité de nitrocellulose énergétique nécessaire au regard des dégâts visuels constatés sur le plan bâtementaire, en intégrant les effets missiles des projectiles retrouvés aux abords du bâtiment ;
- La définition de la sensibilité de la nitrocellulose énergétique, au choc, à la friction et à la température par des essais ou via la bibliographie, en fonction du mode de séchage, notamment au vu des conditions météo ayant précédé l'accident ;
- La détermination si le contact de nitrocellulose énergétique avec du butanol fort (inscription présente sur la cuve eaux blanches nouvellement installée) peut conduire à une réaction exothermique ;
- La détermination si le contact de nitrocellulose énergétique avec le produit cuivré graisseux retrouvé sur site peut conduire à une réaction exothermique.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 209316 - 2769588 - v3.0, 14/11/2023.

Mots-clés :

Explosion, nitrocellulose

Glossaire

| | |
|--------|--|
| BEA-RI | Bureau d'enquêtes et d'analyses - Risques industriels |
| Ineris | Institut national de l'environnement industriel et des risques |
| NC | Nitrocellulose |

1 Introduction

1.1 Déontologie

L'Ineris n'a jamais réalisé d'études pour le compte du site de fabrication de Bergerac de la société Manuco.

1.2 Contexte

La société Manuco, filiale d'Eurengo depuis 2021 produit sur son site de Bergerac, installation classée Seveso Seuil Haut, de la nitrocellulose énergétique principalement à destination du secteur de la Défense, et de la Chimie des laques et peintures.

Le 3 août 2022, une succession d'explosions s'est produite au sein d'un des bâtiments de fabrication du site. Le bâtiment concerné est un bâtiment dans lequel se déroulent des opérations de post nitration, notamment de traitement de la fibre et de fixation par chauffage.

À la suite de l'accident, le BEA-RI a invité l'Ineris en tant qu'expert technique lors de l'enquête sur site du 9 août, puis a missionné l'Ineris par courriel en date du 24 septembre 2022 afin de répondre à plusieurs questions. Le courriel de demande est présenté en Annexe 1 de ce rapport.

Les questions portent sur :

- Estimer les niveaux de surpression, de la masse équivalente de TNT et de la quantité de nitrocellulose énergétique nécessaire au regard des dégâts visuels constatés sur le plan bâtementaire, en intégrant les effets missiles des projectiles retrouvés aux abords du bâtiment ;
- Définir la sensibilité de la nitrocellulose énergétique au choc, à la friction et à la température par des essais ou via la bibliographie, en fonction du mode de séchage, notamment au vu des conditions météorologiques ayant précédé l'accident ;
- Déterminer si le contact de nitrocellulose énergétique avec du butanol fort (inscription présente sur la cuve eaux blanches nouvellement installée) peut conduire à une réaction exothermique ;
- Déterminer si le contact de nitrocellulose énergétique avec le produit cuivré graisseux retrouvé sur site peut conduire à une réaction exothermique.

1.3 Visite et réunions d'échanges

Pour cette analyse, l'Ineris a réalisé une visite du site de Manuco en présence du BEA-RI, du SDIS, de l'inspection des installations classées en charge du suivi du site, de la police judiciaires et scientifiques et l'OCLAESP¹ le 9 août 2022. L'Ineris s'est également rendu sur site le 17 août 2022 afin de prélever des échantillons en plusieurs points de la partie Est du bâtiment incriminé.

¹ Office central de lutte contre les atteintes à l'environnement et à la santé publique

3 Description de l'installation concernée et informations sur l'événement

3.1 Description générale du site et de l'installation concernée

La société Manuco, filiale de la société Eurenco, produit sur son site de Bergerac, site de l'ancienne Poudrerie nationale de Bergerac, de la nitrocellulose énergétique pour des applications Défense ou pour des applications civiles (comme les filtres, laques et peintures).

Le site est une installation classée autorisée et « SEVESO Seuil Haut » pour les rubriques au titre de la rubrique 4441 (liquides comburants), et de la rubrique 4110.2 (substances et mélanges liquides toxiques) et « Seuil Bas » pour la rubrique 4130 (substances et mélanges liquides toxiques) de la nomenclature des installations classées.

La nitrocellulose énergétique est produite à base de linters de coton ou de pulpe de bois. La production s'effectue en continu, 24h/24, 7j/7. Le procédé consiste en la nitration de rouleaux de cellulose dans des réacteurs contenant un mélange d'acide sulfonitrique. Ensuite, la cellulose nitrée devenue nitrocellulose (NC), est essorée enessoreuse centrifuge pour la séparer de la phase liquide et lavée à contre-courant avec de l'eau. Enfin, la NC est densifiée sous forme d'une pâte plus visqueuse en autoclave. La pâte de NC est ensuite raffinée par une succession d'épaississeur et raffineur (cisaillement mécanique). La viscosité est ensuite encore une fois ajustée par cuisson, où des carbonates sont également ajoutés pour neutraliser toutes traces d'acide libre encore présent dans l'eau et ainsi augmenter la stabilité de la nitrocellulose. A la fin du procédé et lors de son conditionnement, la nitrocellulose contient encore 30 % d'eau. Le maintien sous eau, ou sous alcool, permet de stabiliser la nitrocellulose, qui à l'état sec devient très sensible et peut s'auto-enflammer à basse température.

L'accident a eu lieu dans un bâtiment de fabrication de nitrocellulose. Adjacent à un autre bâtiment servant au stockage de fûts vides, le bâtiment incriminé regroupe l'ensemble des activités ayant lieu après l'étape de nitration, c'est-à-dire les équipements de finition et de conditionnement de la nitrocellulose. L'évènement a plus précisément eu lieu sur le process de raffinage situé en partie Est du bâtiment (encart en rouge sur la Figure 1) et séparé du reste du process par une large travée de circulation.

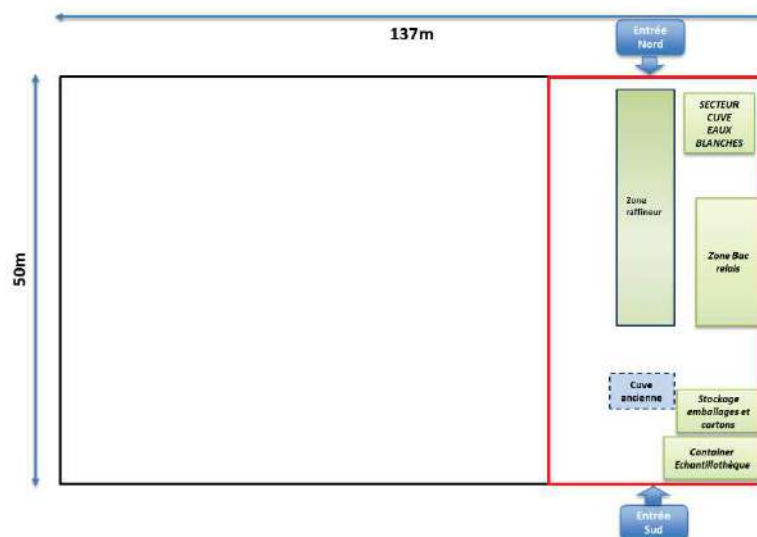


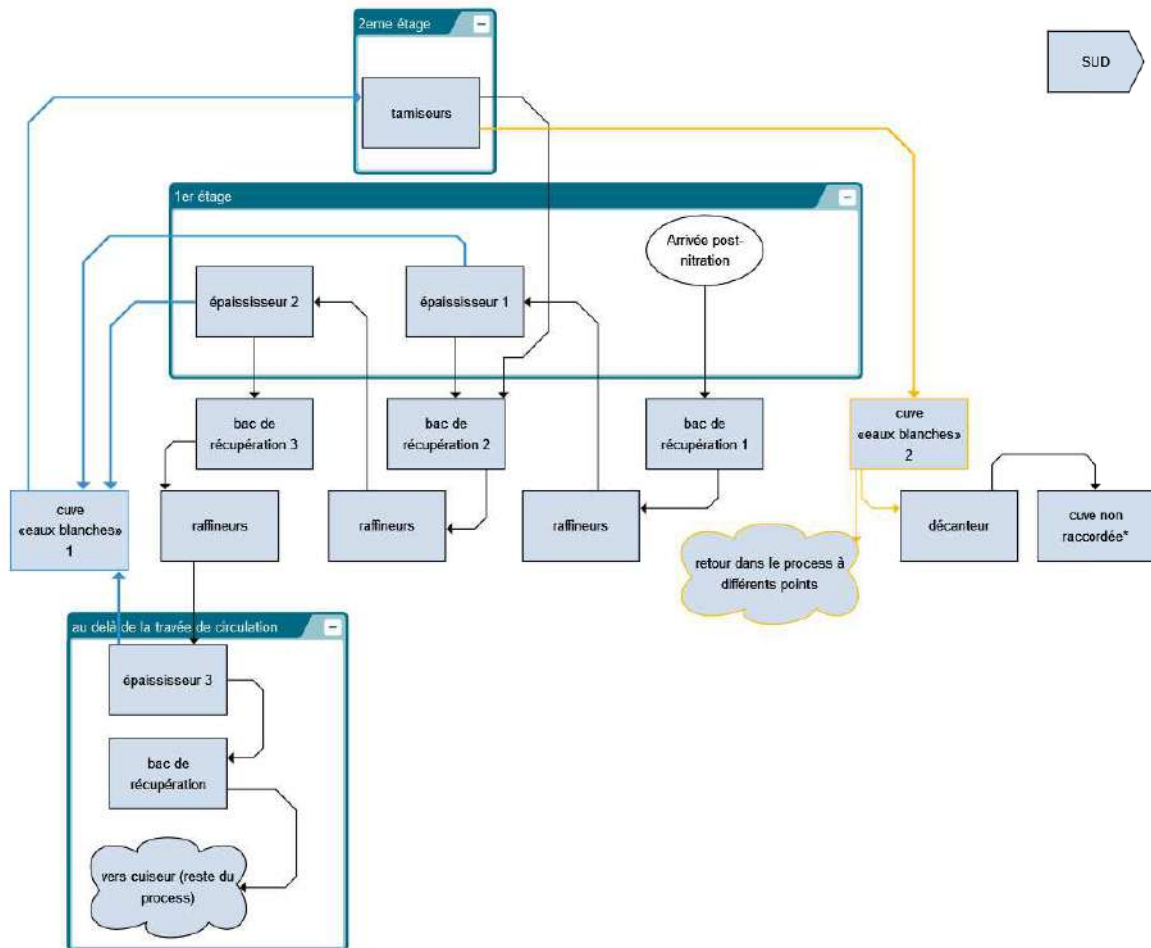
Figure 1 : Bâtiment et zone de l'accident sur le process de raffinage (en rouge)

La Figure 2 présente le process de l'activité de raffinage située en partie Est du bâtiment incriminé. Elle permet de se représenter visuellement et dans l'espace la disposition des éléments intervenants de l'activité de raffinage en fonctionnement normal. On distingue 3 réseaux de circulation de mélange eau/NC :

- Le réseau de production : il s'agit du réseau principal transportant la NC post nitration à travers les différentes étapes de fabrication. A l'endroit de l'accident il s'agit de l'étape de raffinage qui consiste

en une succession d'étapes de malaxage/hachage par raffineurs et de concentration par épaisseurs fonctionnant par centrifugation.

- Le réseau dit d'« eaux blanches non filtrées » : il s'agit du réseau d'eau récupérée après passage dans les épaisseurs Cette eau va ensuite dans les tamiseurs. Cette eau contient les fibres de NC les plus fines issues du réseau principal.
- Le réseau dit d'« eaux blanches filtrées » : il s'agit du réseau d'eau récupérée après passage dans les tamiseurs. Cette eau est remise dans le circuit principal en amont du raffinage. Cette eau est celle avec le moins de concentration en nitrocellulose de tout le réseau, et contient les fibres de NC les plus fines de tout le réseau. Il est à noter que l'eau concentrée en fibres à l'issue du tamisage est réinjectée dans le circuit principal en aval de l'épaisseur 1.



* Conformément au diagramme « PID » fourni par la société Manuco, cette cuve est reliée au reste du process. D'après les informations transmises par l'exploitant, cette cuve n'est dans les faits plus connectée au reste du process.

Figure 2 : Description de la chaîne de raffinage du bâtiment, en respectant la disposition spatiale des éléments, le flux de circulation du mélange eau/NC. En Bleu le réseau d'eaux blanches non filtrées, et en Orange le réseau d'eaux blanches filtrées.

3.2 Description succincte de l'événement

Depuis le 25 juin 2022, la partie nitration en amont est en arrêt technique ; puis le 22 juillet 2022 est effectuée la procédure d'arrêt pour maintenance d'été.

Dans le cadre des interventions prévues sur la partie raffinage, la cuve d'eaux blanches n°1 est remplacée, et les raffineurs en maintenance.

Le 3 août 2022, vers 13h50, lors du raccordement des brides de la canalisation existante connectée à l'épaississeur 3 avec la nouvelle canalisation reliée à la nouvelle cuve n°1 (voir la Figure 3), une explosion se produit. Par la suite, plusieurs explosions et combustions ont eu lieu sur plusieurs réseaux de canalisation d'eau mélangée à la NC, et au sein de certaines cuves et appareils connectés à ces réseaux.



Figure 3 : Photo post accident de la canalisation en cours de raccordement

Il est à noter qu'au moment de l'accident des sections de canalisation sont démontées. Les principaux changements comparés à la Figure 2 sont :

- les raffineurs entre les épaisseurs n° 3 et n°2 ne sont pas connectés entre eux ;
- l'épaississeur n°3 n'est pas connecté au dernier raffineur.

4 Réponses aux questions posées par le BEA-RI

4.1 Question N°1 du BEA-RI - Estimation des quantités de nitrocellulose énergétique ayant pu réagir

La première question posée par le BEA-RI concerne l'estimation des niveaux de surpression, de la masse équivalente de TNT et de la quantité de nitrocellulose énergétique nécessaire au regard des dégâts visuels constatés sur le plan bâtementaire, en intégrant les effets missiles des projectiles retrouvés aux abords du bâtiment.

Afin d'apporter des éléments de réponse, l'Ineris présente en premier lieu une synthèse des principaux dégâts liés aux effets de surpression observés sur les équipements du process et sur le bâtiment. Sur cette base, une estimation des lieux potentiels de décharge d'explosion sur le process a été réalisée. Enfin, l'Ineris a estimé la quantité de nitrocellulose énergétique probable ayant réagi à différents endroits du process.

4.1.1 Synthèse des principaux dégâts de surpression ou projection de fragments sur les équipements du process et le bâtiment et estimation des lieux potentiels de décharge d'explosion

Les principaux dégâts de surpression ou liés à des projections de fragments observés sur le bâtiment sont les suivants :

Façade Nord du bâtiment :

- rupture totale des enfilades vitrées sur une dizaine de mètres, et partielle sur environ 30 m avec projection à une dizaine de mètres ;
- rupture des menuiseries vitrées ;
- rupture localisée de murs en briques.



Figure 4 : Dégâts en façade Nord du bâtiment

Façade Sud :

- rupture totale des enfilades vitrées sur environ 70 m avec projection à quelques mètres du mur ;
- rupture des menuiseries vitrées sur environ 70 à 100 m ;
- nombreuses perforations des murs en briques ;
- présence de nombreux fragments en acier à l'extérieur jusqu'à 30 m de la façade au droit du mur et environ 60 m de la zone d'explosion.



Figure 5 : Dégâts en façade Sud du bâtiment



Figure 6 : Perforations du mur en briques



Figure 7 : Projection de fragments au Sud du bâtiment

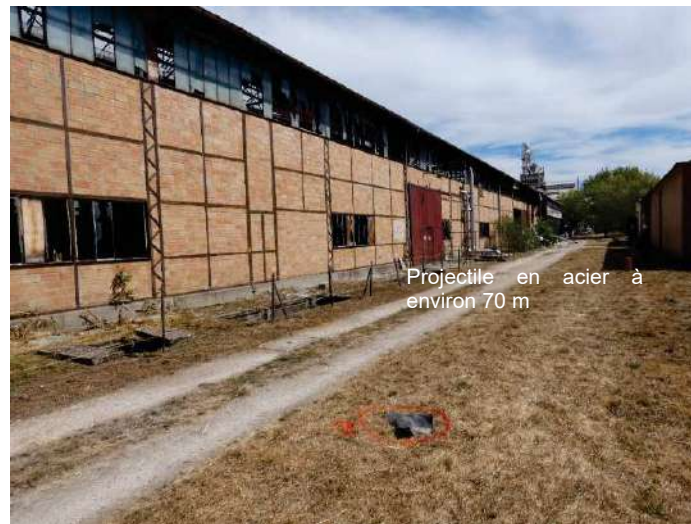


Figure 8 : Projections de fragments

Couverture de toiture :

- Côté Nord : bardage totalement arraché sur 4 à 5 m au droit des tamiseurs et partiellement arraché sur une vingtaine de mètres ;



Figure 9 : Dégâts subis par la couverture de toiture – partie Nord

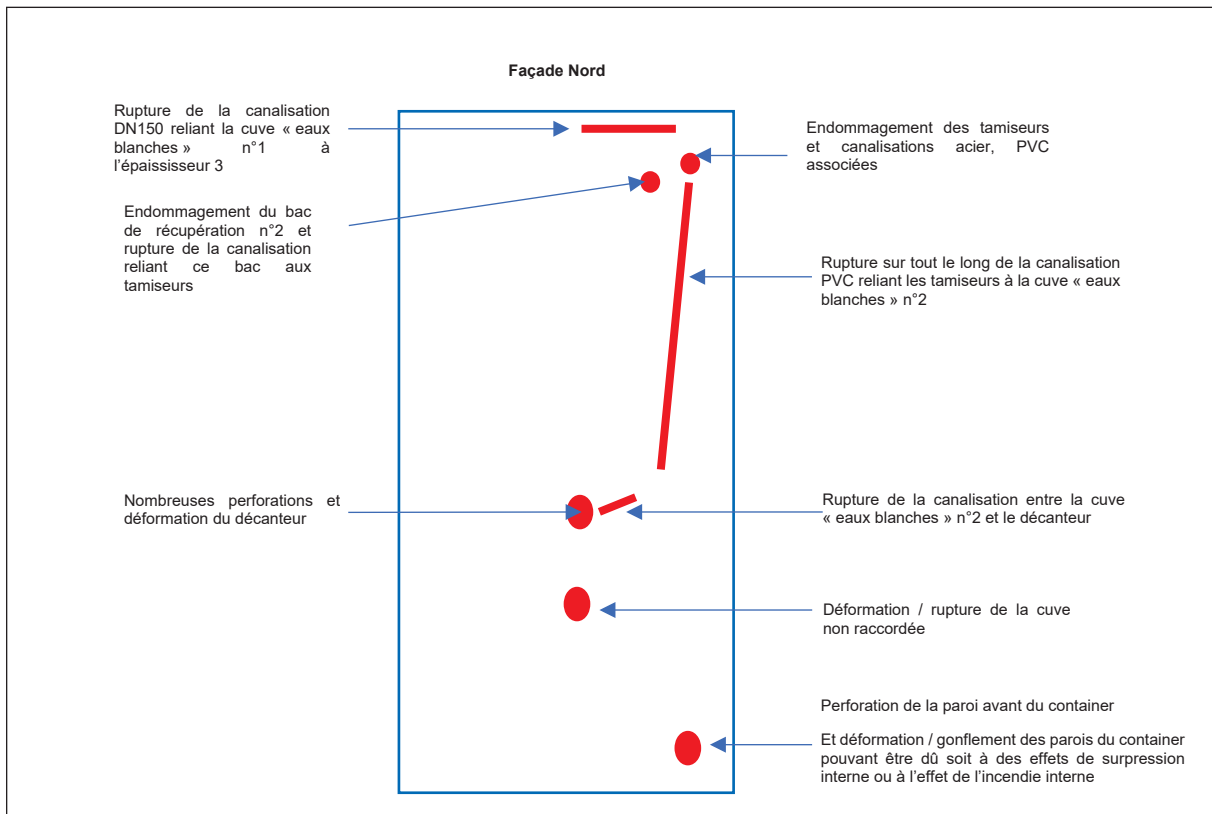


Figure 12 : Principaux dégâts liés aux effets de surpression ou de projection de fragments observés sur les équipements du process – partie Est du bâtiment - vue du dessus



Figure 13 : Rupture de la canalisation DN150 reliant la cuve « eaux blanches » n°1 à l'épaisseur 3



Figure 14 : Endommagement des battants et rupture de la vitre du bac de récupération 2 et rupture de la canalisation reliant ce bac aux tamiseurs



Figure 15 : Endommagement des tamiseurs et des canalisations acier, PVC associées



Figure 16 : Rupture sur tout le long de la canalisations PVC reliant les tamiseurs à la cuve « eaux blanches » n°2



Figure 17 : Rupture de la tuyauterie entre la cuve « eaux blanches » n°2 et le décanteur et perforation de celle-ci (à gauche) et déformation et nombreuses perforations du décanteur (à droite)



Figure 18 : Dommages subis par la cuve non raccordée



Figure 19 : Dommages subis par le container

De l'analyse qualitative de l'ensemble de ces principaux dommages sur les équipements du process et sur le bâtiment, il est possible d'identifier 6 lieux de décharges potentiels d'explosion sur le process. Ceux-ci sont présentés sur la figure ci-après. Il est à noter que le container de 20 pieds, situé au Sud-Est du bâtiment, pourrait être un autre lieu de décharge d'explosion. Toutefois le gonflement observé de ces parois pourrait également être la conséquence d'un incendie interne.

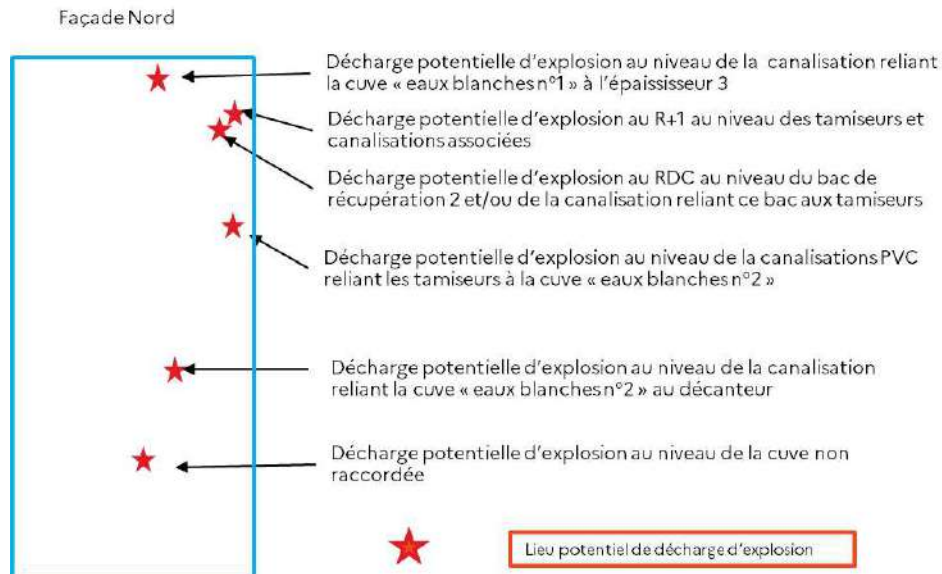


Figure 20 : Lieux potentiels de décharge d'explosion – Bâtiment – partie Est vue du dessus

4.1.2 Estimation de la quantité de nitrocellulose énergétique probable mise en jeu à différents endroits du process

L'Ineris a estimé la quantité de nitrocellulose énergétique probable ayant réagi à différents endroits du process. L'étude de l'Ineris s'est focalisée en accord avec le BEA-RI sur les parties suivantes :

- la cuve non raccordée ;
- la canalisation en PVC reliant les tamiseurs à la cuve « eaux blanches » n°2 ;
- la canalisation en acier reliant la cuve « eaux blanches » n°1 à l'épaisseur 3.

Pour ce faire, l'Ineris a dans un premier temps estimé au regard des différents dégâts sur le bâtiment et sur les équipements du process les niveaux de surpression susceptibles d'avoir été engendrés par les décharges d'explosion. L'Ineris a également complété cette analyse par l'évaluation des effets missiles des projectiles retrouvés dans ou aux abords du bâtiment.

4.1.2.1 Estimation de la quantité de nitrocellulose énergétique probable au niveau de la cuve non raccordée

D'après les informations transmises par Manuco, la cuve est une cuve métallique à double paroi de dimensions approximatives 3,90 m x 3 m par 1,60 m de haut posée sur un support métallique à 2,20 m du sol.

L'analyse des dégâts montre que la cuve a subi une forte explosion interne, comme l'illustre la Figure 18. En l'absence de plan de la cuve et de données mécaniques associées, les dégâts observés sur la cuve sont difficilement exploitables afin d'en déduire le niveau de surpression interne atteint lors de l'explosion. Aussi l'Ineris a tenté d'estimer ce niveau de surpression interne à une quantité de produits ayant réagi, à partir des dégâts constatés sur le bâtiment ou les équipements situés à proximité de la cuve, que l'on suppose donc être produits par l'explosion de la cuve.

4.1.2.1.1 Analyse des projections des fragments de la cuve

Les photographies en Figure 6, Figure 7, Figure 8 et Figure 17 illustrent les dégâts engendrés par la projection de fragments, provenant vraisemblablement de la cuve, située à proximité.

Des fragments ont perforé le décanteur et la canalisation entre le décanteur et la cuve « eaux blanches » n°2. Les calculs basés sur le modèle d'impact semi-empirique IMFRA² montrent que :

- pour qu'un fragment de 2 à 4 cm de côté perce la paroi en inox du décanteur, sa vitesse d'impact doit être de l'ordre de 140 à 170 m/s ;
- pour qu'un fragment de 1,5 cm de côté perce la canalisation reliant le décanteur et la cuve « eaux blanches » n°2 (de 2 à 3,5 mm), sa vitesse d'impact doit être de l'ordre de 140 à 230 m/s.

D'autres fragments ont été retrouvés à l'extérieur du bâtiment à une distance de 30 m au droit de cuve et pouvant aller jusque 60 m. Parmi eux, certains ont traversé le mur en briques situé à 10 m, d'autres ont sans doute été projetés vers le haut et traversé la toiture.

En supposant que le fragment d'environ 1 kg (dimensions approximatives de 50 cm de long, 10 cm de large) et 3 mm d'acier (épaisseur de la cuve non raccordée) retrouvé à 30 m au droit du mur en brique a traversé le mur, on détermine que sa vitesse d'impact a dû être au moins de 200 m/s (vitesse nécessaire pour traverser le mur en brique). Pour pouvoir ensuite être projeté à la distance de 30 m, sa vitesse initiale devait être supérieure ou égale à 204 m/s, ce qui correspond à une énergie cinétique initiale de l'ordre de 20 800 J.

En supposant que le fragment de l'ordre de 20 cm sur 20 cm (fragment en acier de 1 kg environ) retrouvé à 60 m de la cuve, a traversé la toiture, on calcule, en considérant un angle d'éjection par rapport à l'horizontale de 30 à 60°, une vitesse initiale de 60 à 120 m/s nécessaire pour atteindre la distance de projection de 60 m.

Ainsi, l'analyse des dégâts montre que la vitesse d'éjection des fragments a dû être de l'ordre de 60 à 230 m/s. On peut alors en déduire que l'impulsion communiquée aux fragments d'enveloppe serait de l'ordre de 1400 à 4700 Pa.s.

Ensuite, 3 hypothèses ont été considérées pour remonter à une masse de nitrocellulose ayant réagi, en tenant compte de la nature du produit et la conception de la cuve (double paroi) :

- Hypothèse n°1 : la masse de nitrocellulose ayant réagi est supposée être initialement en contact avec les fragments projetés
- Hypothèse n°2 : scénario d'éclatement de la cuve à la suite d'une montée en pression due à une explosion interne en fond de cuve
- Hypothèse n°3 : scénario d'éclatement de la cuve à la suite d'une montée en pression due à une explosion interne dans l'espace entre les 2 parois de la cuve

Concernant la nature du produit, d'après les enseignements tirés de la bibliographie (cf. point 3) :

- une fois initiée, la décomposition de la nitrocellulose peut transiter en détonation ;
- la vitesse de décomposition et l'énergie libérée dépendent de l'état physico-chimique du produit (cf. Figure 21) :
 - la nitrocellulose à 14% densifiée (1 500 kg/m³) présente une vitesse de détonation de l'ordre de 6000 m/s et une énergie de l'ordre de 6000 kJ/kg ;
 - la nitrocellulose fibreuse peu dense (170 kg/m³) présente une vitesse de détonation de l'ordre de 2000 m/s et une énergie de l'ordre de 3000 kJ/kg.

² [Omega 23 - Résistance des structures industrielles à l'impact de projectiles d'origine accidentelle | Ineris \(mars 2018\)](#)

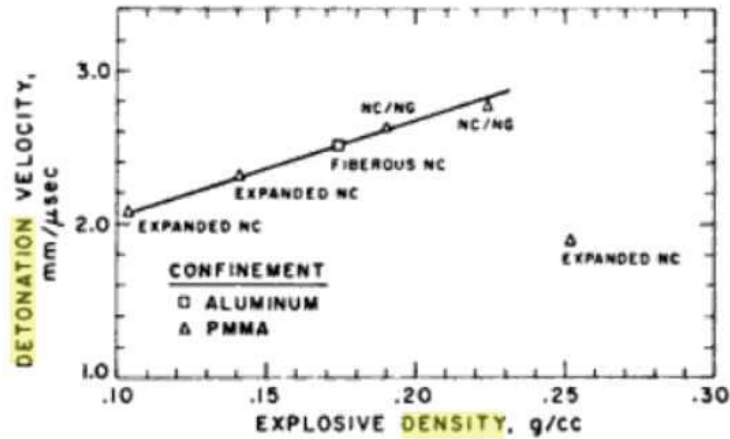


Figure 21 : Vitesse de détonation en fonction de la nature et de la densité de la nitrocellulose³

Hypothèse n°1 : détonation d'une masse de nitrocellulose initialement en contact avec les fragments projetés

Nous avons vu précédemment que les fragments de cuve projetés ont dû subir une impulsion de l'ordre de 4 700 Pa.s. L'impulsion est définie comme étant l'intégrale de la surpression en fonction du temps. En cas de détonation, en première approche, on peut donc calculer l'impulsion I à partir de la surpression maximale engendrée par la détonation DP_{max} et de la durée de détonation $t_{détonation}$, à partir de la relation suivante :

$$I = 1/2 \times DP_{max} \times t_{détonation}$$

En cas de détonation, la surpression est supposée constante au sein de la nitrocellulose, et égale à la surpression maximale théorique (Chapman-Jouguet).

La durée de la détonation peut se calculer à l'aide du rapport entre la dimension caractéristique de la quantité de nitrocellulose réagissant et la vitesse de détonation.

En cas de détonation de nitrocellulose 14% densifiée (i.e. le produit fini), la pression de détonation serait de 24 300 bar au sein de la nitrocellulose, et la vitesse de détonation de 6 000 m/s. Ainsi, l'impulsion de 4 700 Pa.s peut être atteinte pour une masse de nitrocellulose supérieure à 80 g.

En cas de détonation de fibres de nitrocellulose peu denses, la pression de détonation serait de 1 530 bar au sein de la nitrocellulose, et la vitesse de détonation de 2 000 m/s. Ainsi, l'impulsion de 4 700 Pa.s peut être atteinte pour une masse de nitrocellulose supérieure à 1 300 g.

L'analyse de l'hypothèse n°1 montre que la détonation d'une quantité de nitrocellulose relativement limitée (entre 80 et 1300 g) permettrait d'engendrer une impulsion suffisante pour projeter des fragments de la cuve en contact avec la nitrocellulose aux distances observées.

³ OFFICE OF NAVAL RESEARCH ARLINGTON VA, « Detonation, Proceedings » (Symposium (International) on Detonation, Pasadena, California, 1970), <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0751413>.

Hypothèse 2 : Scénario d'éclatement de la cuve à la suite d'une montée en pression due à une explosion interne en fond de cuve

En raison du manque d'informations sur la cinétique de libération de l'énergie, nous n'avons pas pu étudier l'influence de l'ouverture sur la pressurisation de la cuve en cas de réaction de la nitrocellulose présente dans la cuve. De plus, en cas de réaction très rapide (type détonation), l'ouverture de la cuve n'aurait pas d'influence sur la pressurisation de la cuve, car la détonation est un phénomène beaucoup plus rapide que la rupture de la cuve. Le calcul a donc été **réalisé en supposant la cuve fermée** :

- En considérant une vitesse de dépressurisation du volume de gaz sous pression de l'ordre de 500 à 1 000 m/s (vitesse du son dans les gaz très chauds), la durée de dépressurisation maximale (longueur de détente de l'ordre de 2 m) serait de l'ordre de 6 à 12 ms.
- En considérant une durée de dépressurisation moyenne de l'ordre de 10 ms, on calcule alors une surpression interne dans la cuve de l'ordre de 2,8 à 9,5 bar engendrant l'impulsion cible de 1 400 à 4 700 Pa.s déduite des distances de projection observées.
- En assimilant le gaz contenu dans la cuve au moment de la rupture à de l'air ($\gamma = 1,4$), l'énergie de pression associée (13 à 47 MJ) correspondrait à une masse équivalente de TNT de 2,8 à 10 kg ⁽⁴⁾.
- **En cas de détonation de NC 14% densifiée (6 000 kJ/kg), une masse de l'ordre de 2,2 kg serait suffisante.**
- **En cas de détonation de fibres de NC peu dense (3 000 kJ/kg), une masse de l'ordre de 4,4 kg serait suffisante.**

Ainsi, l'analyse de l'hypothèse n°2 montre qu'en cas de montée en pression de la cuve à la suite d'une détonation interne de nitrocellulose, la détonation de quelques kilogrammes de nitrocellulose dans la cuve permettrait d'engendrer une impulsion suffisante pour projeter les fragments de cuve aux distances observées.

Hypothèse 3 : Scénario d'éclatement à la suite d'une explosion interne dans l'espace entre les 2 parois de la cuve

En l'absence d'information sur la distance entre les 2 parois de la cuve, nous avons supposé un espace de l'ordre de quelques cm (typiquement 5 cm), supposé clos :

- En considérant une vitesse de dépressurisation du volume de gaz sous pression de l'ordre de 500 à 1000 m/s (vitesse du son dans les gaz très chauds), la durée de dépressurisation maximale (dimension caractéristique de l'ordre de 0,4m) serait de l'ordre de 2 ms.
- On calcule alors une surpression interne dans l'espace entre les parois de l'ordre de 14 à 47 bar engendrant l'impulsion cible de 1 400 à 4 700 Pa.s.
- En assimilant le gaz contenu dans la cuve au moment de la rupture à de l'air ($\gamma = 1,4$), l'énergie de pression associée (1 à 3,7 MJ) correspond à une masse équivalente de TNT de 0,23 à 0,78 kg.
- En cas de détonation de NC 14% densifiée (6 000 kJ/kg), une masse de l'ordre de 0,180 kg serait suffisante
- En cas de détonation de fibres de NC peu dense (3 000 kJ/kg), une masse de l'ordre de 0,360 kg serait suffisante

L'analyse de cette hypothèse montre que la détonation de quelques centaines de grammes de nitrocellulose dans l'espace (supposé clos) entre les parois de la cuve permettrait d'engendrer une impulsion suffisante pour projeter les fragments de paroi aux distances observées.

⁴ Energie de détonation du TNT de 4,69 MJ/kg.

4.1.2.1.2 Analyse des dégâts liés aux effets de surpression observés sur le bâtiment

Dégâts observés sur la toiture du bâtiment :

La photographie en Figure 10 illustre les dégâts observés au niveau de la toiture du bâtiment au droit de la cuve non raccordée.

La toiture du bâtiment se trouve à 8-10 m de hauteur ; le fond de cuve se trouve donc à 6-8 m des bardages en toiture les plus proches.

La totalité des bardages a été arrachée au droit de la cuve, sur environ 10 m de part et d'autre de la cuve, ce qui implique, d'après le retour d'expérience de l'Ineris, un niveau de surpression supérieur à 50-100 mbar sur cette zone. La mise en œuvre de l'abaque de décroissance de la surpression en fonction de l'éloignement en cas de détonation de TNT montre qu'une telle fourchette de surpression correspondrait à la détonation d'une masse de TNT comprise entre 140 et 840 g. On en déduit alors, à partir de l'énergie de détonation de la nitrocellulose, qu'une masse de fibres de NC supérieure à 200 g à 1,3 kg, ou une masse de NC à 14% supérieure à 650 g, aurait pu produire un tel niveau de surpression.

Au-delà de 60 m de la cuve, on constate que les bardages n'ont pas été endommagés, aussi le niveau de surpression devait être inférieur à la trentaine de mbar au-delà de 60 m. On en déduit une masse de TNT inférieure à 5,7 kg, une masse de fibres de NC inférieure à 9 kg, et une masse de NC à 14% inférieure à 4,5 kg.

Dégâts observés sur la façade Sud :

La photographie en Figure 5 illustre les dégâts observés sur la façade Sud du bâtiment.

On constate la rupture des enfilades vitrées situées en partie haute de la façade jusqu'à environ 60 m de la cuve, ce qui implique, d'après le retour d'expérience de l'Ineris, une surpression de l'ordre de 15 à 20 mbar à 60 m. On peut donc déduire de ces dégâts une masse de TNT comprise entre 1,8 et 2,5 kg, une masse de fibres de NC comprise entre 2,8 et 3,9 kg, ou encore une masse de NC à 14% comprise entre 1,4 à 2 kg.

On constate également que le mur de remplissage en briques creuses d'environ 7 cm d'épaisseur, situé à 10 m au droit de la cuve, a résisté aux effets de surpression, ce qui implique, selon les méthodes forfaitaires⁵ et les calculs menés par l'Ineris, un niveau de surpression inférieur à environ 150 mbar. On en déduit alors une masse de TNT inférieure à 1 kg, une masse de fibres de NC inférieure à 1,6 kg, ou encore une masse de NC à 14% inférieure à 0,8 kg

L'analyse des dégâts observés sur la toiture et la façade Sud du bâtiment montre que la détonation de l'ordre du kilogramme de NC dans la cuve non raccordée permettrait d'engendrer les dégâts de surpression observés.

4.1.2.2 Estimation de la quantité de nitrocellulose énergétique dans la canalisation PVC reliant les tamiseurs à la cuve « eaux blanches » n°2

Les photographies en Figure 16 montrent que la canalisation en PVC de DN 200 a été entièrement détruite (en miettes, pas de fragments retrouvés) sur une longueur de 30 m environ, ce qui laisse penser que la nitrocellulose a dû détoner à l'intérieur de la canalisation.

⁵ Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) La résistance des structures aux actions accidentelles – Ineris DRA-2007-N° 46055/77288 en date du 10/01/2007.

Pour une telle canalisation en PVC présentant un diamètre interne de 200 mm, et une épaisseur de 4 mm, la pression de rupture⁶ a été estimée à 17 bar (en considérant une contrainte limite du PVC de 40 MPa). Toutefois, la canalisation ayant été entièrement réduite en miettes, la surpression a sans doute été supérieure.

Afin d'estimer la quantité minimale de produit qui aurait réagi dans la canalisation DN 200 en PVC, nous avons considéré que la totalité du volume interne du tronçon de canalisation détruit⁷ (soit 0,9 m³) a été pressurisé par les gaz de détonation sous 17 bar. L'énergie de pression associée s'élève alors à 5 340 kJ⁸.

En considérant une détonation du produit fini dans la canalisation, on calcule, à l'aide de l'énergie de détonation de la nitrocellulose à 14% de 6 211 kJ/kg, qu'une masse de NC à 14% de 860 g serait nécessaire pour libérer une telle énergie. En considérant une masse volumique de l'ordre de 1500 kg/m³ pour le produit fini, on calcule qu'une telle quantité répartie uniformément sur les 30 m de longueur représenterait une épaisseur de l'ordre de 1 mm.

En considérant la détonation des fibres de NC (peu dense), présentant une énergie de décomposition de l'ordre de 3 000 kJ/kg, on calcule une masse de fibres de 1,780 kg. En considérant une masse volumique de l'ordre de 170 kg/m³, une telle quantité répartie uniformément sur les 30 m de longueur représenterait une épaisseur de fibres de l'ordre de 7 mm.

4.1.3 Estimation de la quantité de nitrocellulose énergétique dans la canalisation en acier reliant la cuve « eaux blanches » n°1 à l'épaisseur 3

Les photographies en Figure 13 illustrent les dégâts constatés sur la canalisation en acier reliant la cuve « eaux blanches » n°1 à l'épaisseur 3.

D'après les observations, un tronçon de canalisation DN 150 de 5 m de longueur a été totalement détruit, vraisemblablement à la suite de la détonation d'un dépôt de nitrocellulose dans la canalisation.

Etant donné le diamètre interne (150 mm), l'épaisseur supposée de l'ordre de 2 mm et la contrainte de ruine de l'acier Inox 304 L de l'ordre de 500 à 670 MPa, la pression de rupture de cette canalisation a été estimée de l'ordre de 130 à 180 bar. Sa destruction implique donc que sur le tronçon détruit, la surpression interne a dû être supérieure ou égale à 130 à 180 bar.

Le tronçon de canalisation de 5 m de long et 150 mm de diamètre interne présente un volume interne de 0,09 m³ environ. En considérant que tout ce volume est pressurisé sous 180 bar (respectivement 130 bar) par des gaz de détonation ($\gamma=1,3$), on calcule une énergie de pression 5 300 kJ (respectivement 3 800 kJ). Une telle énergie peut être libérée par la détonation :

- d'une masse de 850 g (respectivement 620 g) de nitrocellulose à 14%, ce qui représenterait une épaisseur de 3,5 mm (respectivement 2 mm) sur les 5 m de longueur en considérant le fond de canalisation uniformément rempli (comme avec un liquide) ,
- d'une masse fibres de NC de 1,767 kg (respectivement 1,27 kg), ce qui représenterait une épaisseur de fibres de 26 mm (respectivement 21 mm) sur les 5 m de longueur en considérant le fond de canalisation uniformément rempli (comme avec un liquide).

⁶ Pression uniformément répartie sur les parois internes d'un cylindre creux d'épaisseur e et de rayon R : $P = \sigma e / R$ σ contrainte.

⁷ Canalisation présentant un diamètre interne de 200 mm, tronçon de 30 m de long.

⁸ Énergie de pression = énergie de Brode = $DP \times V / (\gamma - 1)$ avec DP la surpression dans le tronçon de volume V , et γ le rapport des chaleurs spécifiques des gaz de détonation, considéré égal à 1,3.

4.1.4 Conclusion

L'analyse des projections des fragments de la cuve non raccordée a permis d'estimer la quantité de nitrocellulose susceptible d'avoir détoné dans la cuve, en considérant trois hypothèses de modélisation d'explosion interne. Les résultats de cette analyse montrent que, selon les hypothèses retenues, **la détonation d'une quantité de nitrocellulose allant d'une quantité relativement limitée à quelques kilogrammes dans la cuve** serait suffisante pour engendrer les effets de projection observés. L'analyse des dégâts observés sur la toiture et la façade Sud du bâtiment montre que la détonation d'une masse de nitrocellulose de l'ordre du kilogramme dans la cuve permettrait d'engendrer les dégâts de surpression observés. **Ainsi, les différentes analyses convergent vers une quantité de l'ordre de 1 kg de nitrocellulose ayant susceptible d'avoir réagi dans la cuve non raccordée.**

L'analyse des dégâts observés sur la canalisation DN 200 en PVC en acier montre qu'une quantité de nitrocellulose de l'ordre de 0,86 kg à 1,78 kg (selon la nature du produit : dense ou en fibres peu denses) **a dû réagir dans ces tronçons de canalisation.**

Enfin **l'analyse des dégâts observés sur le tronçon de la canalisation DN 150 en acier montre qu'une quantité de nitrocellulose de l'ordre de 0,62 kg à 1,76 kg** (selon la nature du produit : dense ou en fibres peu denses) **a dû réagir dans ce tronçon de canalisation.**

4.2 Question N°2 du BEA-RI - Etude de la sensibilité de la nitrocellulose énergétique

La seconde question posée par le BEA-RI concerne la définition de la sensibilité de la nitrocellulose énergétique au choc, à la friction et à la température par des essais ou via la bibliographie, en fonction du mode de séchage, notamment au vu des conditions météo ayant précédé l'accident.

Dans un premier temps, l'Ineris s'est attaché à étudier la sensibilité aux stimuli mécaniques et la stabilité thermique d'échantillons prélevés le 17 août. Puis les résultats ont été comparés aux données de la littérature. Enfin, un état de l'art de l'effet du séchage de la NC a été effectué et sera mis en parallèle des conditions météorologiques et d'opération du bâtiment.

4.2.1 Sensibilité aux stimuli mécaniques et stabilité thermique des résidus prélevés

Lors de l'enquête, des résidus fibreux ou solides ont été observés dans la partie inférieure de la paroi intérieure de plusieurs canalisations tubulaires démontées ou endommagées, en partie extérieure de jonctions de canalisations et sur des brides démontées ou endommagées.

En particulier, la canalisation des « eaux blanches filtrées » contenait un tapis d'épaisseur estimée entre 0,5 mm et 1 cm de fibres blanches mais grises en surface.

Des prélèvements ont alors été effectués pour connaître la nature de ces fibres et leur sensibilité de manière comparée à la NC connue en tant que produit fini.

Les 3 premiers prélèvements ont été réalisés à l'étage sous le tamiseur tels qu'illustrés sur la Figure 22.



Figure 22 : Emplacement des prélèvements 1, 2 et 3



Figure 23 : Photo après prélèvement (1)



Figure 24 : Photo après prélèvement (2)



Figure 25 : Photo avant et après prélèvement (3)

Le prélèvement 4 a lieu sur la face interne d'un ensemble de canalisation démonté avant l'incident et sans traces apparentes de combustion.



Figure 26 : Emplacement du prélèvement 4

Les 4 échantillons ont été soumis à une analyse calorimétrique par DSC, et aux tests de sensibilité à l'impact et à la friction selon les moyens d'essai définis par le Manuel ONU d'épreuves et critères. Les rapports sont présentés en Annexe 2 à 6.

Dans le cadre des tests de sensibilité à l'impact et à la friction, les échantillons testés ont été placés à 40 °C pendant 1h avant essai, pour reproduire les conditions environnementales lors de l'accident et éviter de tester des échantillons réhumidifiés par les pompiers et l'environnement de stockage à l'Ineris.

| prélèvement | Energie de décomposition | Energie minimale de réaction à l'impact | Energie minimale de réaction à la friction |
|-------------|--------------------------|---|--|
| 1 | 3 600 J/g | Non testé | Non testé |
| 2 | 3 410 J/g | Non testé | Non testé |
| 3 | 2 240 J/g | 3 J | 324 N |
| 4 | 2 980 J/g | 4 J | 360 N |

La littérature confirme que les valeurs mesurées d'énergie de décomposition correspondent à de la NC à haute nitration (>12,5 %, type 'coton-poudre').

On observe que l'échantillon de NC prélevé à l'intérieur du tube PVC a une énergie notablement plus faible : 1 seul essai de DSC à 3 mg a été réalisé sur une masse de prélèvement de l'ordre du gramme non homogène. La représentativité est questionnable.

Il est également possible que la densité apparente ait une influence comme le cas de l'énergie d'explosion mesurable en bombe calorimétrique.

La littérature confirme que les valeurs mesurées de sensibilité correspondent à de la NC : très faible sensibilité à l'épreuve de friction (autour de 350 N), sensibilité notable à l'impact (3 J).

De même il est logique que la NC dense du tube démonté (Prélèvement 4) soit moins sensible au frottement que la NC fibreuse qui est moins dense, située à l'intérieur du tube PVC (Prélèvement 3).

La faible sensibilité à la friction de la NC n'est qu'apparente : comme la cellulose, la nitrocellulose peut produire en son sein ou avec d'autres matériaux des décharges électrostatiques (triboélectricité) pouvant aboutir à son initiation, tout particulièrement sur de la NC déstabilisée et/ou sèche.

Etant une fibre, la génération de charge par friction est facilitée (augmentation de la surface). Bien que neutre sur l'échelle de la triboélectricité, le coton peut produire des décharges électrostatiques par frottement avec lui-même : la probabilité est réduite en présence d'humidité. La NC est connue pour avoir une meilleure capacité à générer des charges et donc des décharges électrostatiques, car elle est employée dans des dispositifs de nano génération d'électricité⁹. De plus, la sensibilité de la NC varie énormément de 0.061 J en non confiné à 3.1 J en confiné et densifié¹⁰. A titre de comparaison, les gaz inflammables s'enflamment généralement entre 0.001 J et 0.050 J et les poussières non fines s'enflamment autour de 0.1 J.

La sensibilité des résidus est telle qu'attendue en comparaison avec la NC en tant que produit fini.

A titre de comparaison, 3 Joules de sensibilité à l'impact correspondent à un projectile de 60 g à 10 m/s, ou à une masse de 200 g qui tombe de 1,5 m ; c'est une valeur faible, très facilement atteignable avec un marteau manuellement.

4.2.2 Impact du séchage de la NC sur sa stabilité et sensibilité

Un état de l'art a été réalisé pour lister les paramètres influant significativement sur la sensibilité de la NC et étant pertinent dans le cadre cet accident.

Toutes traces d'acides dans l'eau, notamment provenant d'acide nitrique libre au sein des fibres de NC déstabilisent la NC.

Pour rappel, à cette étape du raffinage la présence d'acide libre dans les fibres demeure, tant que l'étape suivante de cuisson n'est pas réalisée : ce qui peut provoquer des inflammations spontanées à causes d'échauffement locaux par auto décomposition (hydrolyse par l'acide libre des groupes nitro qui conduit à libération d'acide nitrique hydrolysant d'autre groupe nitro, le tout produisant de la chaleur).

De plus, il est connu que l'humidification par l'eau a un impact sur la stabilité de la NC après séchage en réduisant l'énergie nécessaire à une décomposition de manière autoentretenu. Selon les essais réalisés par Katoh et al.¹¹, la température de décomposition de la NC sèche est de 150 °C, alors que pour la NC mouillée à 2-2.5 % en masse d'eau, cette température de décomposition baisse de 45 °C à 105 °C. De même certains minéraux présents dans les eaux de ville stabilisent ou déstabilisent la NC après séchage. Pour Guo et al.¹², la température de décomposition auto-accélérée (SADT, calculée) de produit fini comportant une majorité de NC passe de 117 °C sèche à 100 °C humidifiée avec de l'eau.

⁹ Hao-Yang Mi et al., « High-Performance Flexible Triboelectric Nanogenerator Based on Porous Aerogels and Electrospun Nanofibers for Energy Harvesting and Sensitive Self-Powered Sensing », *Nano Energy* 48 (1 juin 2018): 327-36, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.050>; Hisham Mattar et al., « Nitrocellulose: Structure, Synthesis, Characterization, and Applications », no 3 (2020).

¹⁰ Thomas H. Pratt, *Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions* (John Wiley & Sons, 2010); D.C. Agouridis, T.M. Gayle, et W.H. Griest, « Development of the Prototype Munitions Case Moisture Meter, Model ORNL-1. Final Report », 24 février 1993, <https://doi.org/10.2172/10173144>; Basil T. and Sheffield Oliver E. Fedoroff, *Encyclopedia of Explosives and Related Items* Patr 2700 Volume 4 (Picatinny Arsenal, 1969), 4; Thomas M. Klapötke, *Energetic Materials Encyclopedia*, *Energetic Materials Encyclopedia* (De Gruyter, 2018), <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110442922/html>.

¹¹ Katsumi Katoh et al., « Thermal Behavior of Nitrocellulose with Inorganic Salts and Their Mechanistic Action », *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 35, n° 5 (2010): 461-67, <https://doi.org/10.1002/prop.200900074>; Katsumi Katoh et al., « Effect of Industrial Water Components on Thermal Stability of Nitrocellulose », *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 99, n° 1 (1 janvier 2010): 159-64, <https://doi.org/10.1007/s10973-009-0492-7>; Katsumi Katoh et al., « Influence of Water on the Thermal Stability of Nitrocellulose », s. d., 6.

¹² Song Guo et al., « Study on the Influence of Moisture Content on Thermal Stability of Propellant », *Journal of Hazardous Materials* 168, no 1 (30 août 2009): 536-41, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.073>.

La stabilité thermique de la NC est également aggravée avec le temps de séchage. En effet, pour Chai et al.¹³ qui ont étudié la variation du temps de séchage et du pourcentage d'eau dans la NC de départ, plus le séchage est lent plus la température de décomposition auto-accélérée (SADT, calculée) diminue, jusqu'à descendre à 43.5 °C pour 45 h de séchage à 60 °C. De même ils démontrent que la répétition de cycle d'humidification/séchage réduit cette température de décomposition auto-accélérée (SADT, calculée). Dans l'étude de l'influence des différents liquides employés pour stabiliser la NC en stockage, Wei et al.¹⁴ concluent que l'eau, l'isopropanol et l'éthanol abaissent l'énergie nécessaire à une décomposition de manière autoentretenu de la NC après séchage et recommandent de ne pas dépasser les températures suivantes pour du stockage :

| NC seule | NC + eau | NC + éthanol | NC + isopropanol |
|----------|----------|--------------|------------------|
| 54,5 °C | 45,1 °C | 47,2 °C | 50,4 °C |

Il est important de noter que toutes les études sur la NC sont réalisées sur des produits finis, et que l'accident étudié ici concerne des résidus de fabrication. Néanmoins les prélèvements ont pu prouver un comportement de ces résidus identique à la NC sous de forme produit fini. Ces études sont donc tout à fait applicables à ces résidus.

Comme il s'agit de résidus de NC post nitration ayant une réactivité semblable à de la NC à haute nitration, les résidus de NC restant après arrêt de la production ont subi un séchage depuis l'eau avec présence d'acide nitrique.

Du fait des conditions météorologiques où des températures de 38 °C ont été relevées par Météofrance le 3 août 2023 à 16 h 00 et de l'arrêt de la production à cet endroit depuis le 25 juin 2023, les résidus de NC présents dans les canalisations ont subi :

- un séchage lent de plusieurs jours,
- potentiellement des cycles de séchage/humidification.

Au moment de l'accident, les résidus de NC sont donc sensibles à une initiation d'origine mécanique, ou d'origine thermique pouvant résulter d'un échauffement local.

Il est également connu que la température de décomposition auto-accélérée diminue avec la quantité de produit (effet confinant).

Les résidus présents en grande quantité, notamment dans la canalisation des « eaux blanches filtrées », sont donc plus vulnérables que les autres à une initiation d'origine thermique.

Un confinement modéré de la NC suffit après inflammation à provoquer une décomposition. Le confinement des gaz de réaction issus de la décomposition de la NC accélère la décomposition de la NC jusqu'à dépasser un simple régime de combustion et atteindre une déflagration voire une détonation, générant alors des ondes de chocs.

Les résidus présents dans des canalisations, notamment en métal pour lesquels la résistance à la pression est plus importante comparé au canalisation PVC et favorisant le confinement, sont donc plus susceptibles d'entrer dans des régimes de décompositions engendrant les effets les plus destructeurs (déflagration et détonation).

¹³ Hua Chai et al., « Experimental Study on the Effect of Storage Conditions on Thermal Stability of Nitrocellulose », Applied Thermal Engineering 180 (5 novembre 2020): 115871, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115871>.

¹⁴ Wei, Rui Chao, Shen Shi Huang, Zhi Wang, Yu He, Richard Yuen, et Jian Wang. « Estimation on the Safe Storage Temperature of Nitrocellulose with Different Humectants ». Propellants, Explosives, Pyrotechnics 43, no 11 (2018): 1122-28. <https://doi.org/10.1002/prop.201800149>.

Nous n'avons pas pu déterminer l'influence de la taille des fibres de NC, ni l'influence du vieillissement de la NC en eau dans les conditions de production sur la stabilité de la NC. Néanmoins, un début de réponse peut être apporté en comparant la température de début de décomposition de la NC dans la littérature à celle des résidus étudiés ici : on observe une baisse d'environ 10 °C par rapport à la valeur moyenne de 165 °C relevée dans la littérature sur des essais comparables.

Malgré l'absence de données sur la totalité des propriétés physico-chimique des résidus de NC, les paramètres étudiés précédemment sont les plus impactants. En l'occurrence, ici leur influence va dans le même sens d'une déstabilisation de la NC.

4.3 Etude du contact de la nitrocellulose énergétique avec d'autres produits : butanol fort, produits cuivré graisseux

4.3.1 Question N°3 du BEA-RI

La troisième question posée par le BEA-RI concerne le contact de nitrocellulose énergétique avec du butanol fort (inscription présente sur la cuve eaux blanches nouvellement installée) et sa capacité à conduire à une réaction exothermique ;

La NC est stabilisée dans les alcools. Il est même recommandé de stocker la NC en eau ou en alcool. Le Butan-2-ol, le n-butanol et l'isobutanol ont été étudiés comme solvant dans les années 30-40 dans les processus de mise en forme de la NC en laques, sans remarques sur une quelconque incompatibilité. Il n'y a donc pas d'incompatibilité chimique connue entre la NC et le butanol pouvant conduire à une réaction exothermique.

4.3.2 Question N°4 du BEA-RI

La quatrième question posée par le BEA-RI concerne le contact de nitrocellulose énergétique avec le produit cuivré graisseux retrouvé sur site et sa capacité à conduire à une réaction exothermique.

En l'absence de connaissance sur la composition chimique exacte et dans l'incapacité de réaliser une étude expérimentale de la stabilité du mélange, l'Ineris a effectué des recherches en se basant sur des graisses cuivrées similaires : la présence de particules métalliques peut abaisser la stabilité thermique de la NC, néanmoins aucune incompatibilité chimique pouvant induire un échauffement de la NC notable n'est connue dans une échelle de temps de l'ordre de l'heure ou quelques jours.

Manuco a produit une étude de stabilité dans un rapport daté du 18/08/2022. Ainsi nous confirmons qu'une graisse cuivrée, la rouille ou un joint n'a pas d'influence significative à court terme sur de la NC. En revanche, nous émettons une réserve sur la méthodologie employée : les essais réalisés ne sont pas représentatifs d'un effet sur plusieurs mois et années, et la ou les techniques de mesure de l'effet du vieillissement ne sont pas décrites (pesée, analyse spectrométrie IR... ?).

5 Conclusion

A la demande du BEA-RI, l'Ineris a répondu à 4 questions en appui à l'analyse de l'accident survenu dans un atelier de production de nitrocellulose sur le site de Manuco à Bergerac, le 07 aout 2022.

Ces questions portaient sur :

- Estimation des niveaux de surpression, de la masse équivalente de TNT et de la quantité de nitrocellulose énergétique nécessaire au regard des dégâts visuels constatés sur le plan bâtementaire, en intégrant les effets missiles des projectiles retrouvés aux abords du bâtiment ;
- Définir la sensibilité de la nitrocellulose énergétique au choc, à la friction et à la température par des essais ou via la bibliographie, en fonction du mode de séchage, notamment au vu des conditions météo ayant précédé l'accident ;
- Déterminer si le contact de nitrocellulose énergétique avec du butanol fort (inscription présente sur la cuve eaux blanches nouvellement installée) peut conduire à une réaction exothermique ;
- Déterminer si le contact de nitrocellulose énergétique avec le produit cuivré graisseux retrouvé sur site peut conduire à une réaction exothermique.

L'Ineris a estimé la quantité de nitrocellulose énergétique susceptible d'avoir réagi à différents endroits du process sur la base des différents dégâts observés sur le bâtiment et sur les équipements du process. A la demande du BEA-RI, l'Ineris s'est concentré sur la canalisation DN150 en acier reliant la cuve « eaux blanches » n°1 à l'épaississeur 3, sur la canalisation en PVC DN200 reliant les tamiseurs à la cuve « eaux blanches » n°2 et sur la cuve non raccordée. Les différentes analyses menées semblent indiquer qu'une quantité de nitrocellulose de l'ordre de quelques 0,6 à 1,8 kg (selon la nature du produit : dense ou en fibres peu denses) aurait pu réagir dans les tronçons de canalisation DN150 en acier et DN200 en PVC. Une quantité de nitrocellulose de l'ordre de 1 kg serait susceptible d'avoir réagi dans la cuve non raccordée.

L'Ineris a estimé que les résidus fibreux dans et sur les différentes canalisations sont bel et bien de la nitrocellulose, possédant la même sensibilité et réactivité que la nitrocellulose connue et étudiée sous forme de produit fini. Ces résidus sont sensibles aux sollicitations mécaniques, notamment impact, et à l'échauffement. L'aspect fibreux de la nitrocellulose, tel qu'observé dans certaines canalisations, accentue le risque de décharge électrostatique et d'échauffement local. Une fois la nitrocellulose localement initiée, le confinement en canalisation permet une propagation rapide. De même, ce confinement accentue les effets, vers des explosions plus destructrices et génératrices de fragments à plus hautes énergies, ce qui accroît le risque d'effets dominos.

Plusieurs études scientifiques montrent que des températures dans la plage de 43-45°C peuvent théoriquement suffire pour initier une combustion de nitrocellulose de manière auto entretenue, si cette dernière est lentement séchée depuis l'eau : on peut donc en conclure que, avec les températures caniculaires et du fait de quantités non négligeables de nitrocellulose relevées dans des réseaux d'eaux filtrées, l'opération de maintenance s'est déroulée en présence de nitrocelluloses fortement déstabilisées.

Il n'existe pas d'incompatibilité chimique avec les éléments en contact - à savoir le butanol et la graisse cuivrée - avec la nitrocellulose au moment de la maintenance pouvant expliquer à elle seule la réaction observée à l'endroit de l'intervention.

6 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Sollicitation du BEA-RI en date du 24 septembre 2022 – 1 page ;
- Annexe 2 : Fiche d'essais à l'épreuve de frottement : prélèvement 3 – 2 pages ;
- Annexe 3 : Fiche d'essais à l'épreuve d'impact : prélèvement 3 – 2 pages ;
- Annexe 4 : Fiche d'essais à l'épreuve de frottement : prélèvement 4 – 2 pages ;
- Annexe 5 : Fiche d'essais à l'épreuve d'impact : prélèvement 4 – 2 pages ;
- Annexe 6 : Compte rendu d'essais DSC – 5 pages.

7 Références

- Agouridis, D.C., T.M. Gayle, et W.H. Griest. « Development of the Prototype Munitions Case Moisture Meter, Model ORNL-1. Final Report », 24 février 1993. <https://doi.org/10.2172/10173144>.
- Chai, Hua, Qiangling Duan, Huiqi Cao, Mi Li, Kaixuan Qi, Jinhua Sun, et Xiaoli Yang. « Experimental Study on the Effect of Storage Conditions on Thermal Stability of Nitrocellulose ». *Applied Thermal Engineering* 180 (5 novembre 2020): 115871. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115871>.
- Guo, Song, Qingsong Wang, Jinhua Sun, Xin Liao, et Ze-shan Wang. « Study on the Influence of Moisture Content on Thermal Stability of Propellant ». *Journal of Hazardous Materials* 168, n° 1 (30 août 2009): 536-41. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.073>.
- Katoh, Katsumi, Eiko Higashi, Katsuyuki Nakano, Shunsuke Ito, Yusuke Wada, Junichi Kasamatsu, Hiroshi Miya, Masaaki Yamamoto, et Yuji Wada. « Thermal Behavior of Nitrocellulose with Inorganic Salts and Their Mechanistic Action ». *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 35, n° 5 (2010): 461-67. <https://doi.org/10.1002/prop.200900074>.
- Katoh, Katsumi, Shunsuke Ito, Yuji Ogata, Jun-ichi Kasamatsu, Hiroshi Miya, Masaaki Yamamoto, et Yuji Wada. « Effect of Industrial Water Components on Thermal Stability of Nitrocellulose ». *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 99, n° 1 (1 janvier 2010): 159-64. <https://doi.org/10.1007/s10973-009-0492-7>.
- Katoh, Katsumi, Tsutomu Soramoto, Eiko Higashi, Shuhei Kawaguchi, Kosuke Kumagae, Shunsuke Ito, Yuji Wada, Katsuyuki Nakano, et Mitsuru Arai. « Influence of Water on the Thermal Stability of Nitrocellulose », s. d., 6.
- Klapötke, Thomas M. *Energetic Materials Encyclopedia. Energetic Materials Encyclopedia*. De Gruyter, 2018. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110442922/html>.
- Mattar, Hisham, Zahraa Baz, Ahmed Saleh, Ahmed S A Shalaby, Ahmed Elsayed Azzazy, Hesham Salah, et Ibrahim Ismail. « Nitrocellulose: Structure, Synthesis, Characterization, and Applications », n° 3 (2020).
- Mi, Hao-Yang, Xin Jing, Qifeng Zheng, Liming Fang, Han-Xiong Huang, Lih-Sheng Turng, et Shaoqin Gong. « High-Performance Flexible Triboelectric Nanogenerator Based on Porous Aerogels and Electrospun Nanofibers for Energy Harvesting and Sensitive Self-Powered Sensing ». *Nano Energy* 48 (1 juin 2018): 327-36. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.050>.
- OFFICE OF NAVAL RESEARCH ARLINGTON VA. « Detonation, Proceedings ». Pasadena, California, 1970. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0751413>.
- Oliver E. Fedoroff, Basil T. and Sheffield. *Encyclopedia of Explosives and Related Items Patr 2700 Volume 4*. Picatinny Arsenal, 1969.
- Pratt, Thomas H. *Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions*. John Wiley & Sons, 2010.

Annexe 1
Sollicitation du BEA-RI en date du 22 septembre 2022
1 page

Le BEA-RI a décidé le 4 août 2022 d'ouvrir une enquête sur l'évènement survenu le mercredi 3 août 2022 au sein de l'entreprise Manuco, site classé Seveso seuil Haut et situé à Bergerac.

Deux enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur site accompagné d'agents de votre institut. Selon les premiers éléments de l'enquête, cet accident semble être la conséquence d'une série d'explosions dans le cadre de travaux de maintenance au sein du bâtiment incriminé.

Dans la continuité des constats conjoints dressés lors de la visite sur site, nous souhaiterions mobiliser l'expertise de l'Ineris, dans le cadre de sa coopération avec le BEA-RI, pour confirmer par des analyses les éléments suivants :

- Estimation des niveaux de surpression, de la masse équivalente de TNT et de la quantité de nitrocellulose énergétique nécessaire au regard des dégâts visuels constatés sur le plan bâtementaire, en intégrant les effets missiles des projectiles retrouvés aux abords du bâtiment 75 ;
- Définir la sensibilité de la nitrocellulose énergétique au choc, à la friction et à la température par des essais ou via la bibliographie, en fonction du mode de séchage, notamment au vu des conditions météo ayant précédé l'accident ;
- Déterminer si le contact de nitrocellulose énergétique avec du butanol fort (inscription présente sur la cuve eaux blanches nouvellement installée) peut conduire à une réaction exothermique ;
- Déterminer si le contact de nitrocellulose énergétique avec le produit cuivré graisseux retrouvé sur site peut conduire à une réaction exothermique.

Cette expertise pourra autant que de besoins s'appuyer sur des essais en laboratoire selon des protocoles qui seront présentés aux enquêteurs.

Nous souhaiterions pouvoir disposer de vos conclusions au travers d'un rapport (au format pdf) selon un calendrier qui sera défini entre vos équipes et les enquêteurs en charge de l'affaire.

Fait à la Défense, le 24 septembre 2022



Henri KALTEMBACHER

Annexe 2

Fiche d'essais à l'épreuve de frottement : prélèvement 3

2 pages

EPREUVE DE FROTTEMENT BAM - EPREUVE 3B)I)

Nota : ce document a été émis et est géré par DRA/ SUPP / MERC

INFORMATIONS

| | | | | | |
|-----------------|----|-----------------|------------|---------------|----------------|
| Numéro d'essais | 13 | Date de l'essai | 29/09/2022 | N° Prestation | Nitrocellulose |
|-----------------|----|-----------------|------------|---------------|----------------|

RENSEIGNEMENTS SUR LE PRODUIT

| | |
|------------------------------|------------------------------------|
| Nom du produit | Nitrocellulose Bergerac (Tube PVC) |
| Nom du client | BEARI |
| N° de réception | 22A1E002 |
| Date de réception à L'INERIS | 17/08/2022 |
| Aspect | Nitrocellulose |

Préparation de l'échantillon :

- Substance pulvérulente est tamisée (maille de 0,5 mm)
 Substance comprimée, coulée ou condensée est désagrégée et tamisée (maille de 0,5 mm)
 Substance sous forme de pâte est testé à l'état sec si possible (sinon après avoir enlevé la plus grande partie de diluent)

Informations complémentaires

REFERENCES DES MATERIELS UTILISES

| | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|----------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Appareil à frottement | M-A1-8086 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2043 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Plaquettes de porcelaine | 15AG462 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2044 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Crayons de porcelaine | 09AH610 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2045 |
| <input type="checkbox"/> | Tamis (maille de 0,5 mm) | | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2046 |
| | | | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2047 |

CONTRÔLE AVANT ESSAI

- Vérification de l'équilibrage du bras de charge

RESULTAT DE L'EPREUVE

| | | | | |
|-------------------------------------|------------|----------|-------------------|---|
| Force limite⁽¹⁾ : | 324 | N | Résultat : | <input type="checkbox"/> Positif (Force limite < 80 N) |
| | | | | <input checked="" type="checkbox"/> Négatif (Force limite ≥ 80 N) |

⁽¹⁾ Force d'appui la plus basse pour laquelle il a été observé au moins une « explosion » sur six essais

OBSERVATIONS

OPERATEUR(S)

| | | |
|-----------------------------------|---|---|
| | J. RASSON | N. Apchin |
| Nom et Visa de l'opérateur |  |  |

EPREUVE DE FROTTEMENT BAM - EPREUVE 3B)I)

RESULTATS DES ESSAIS⁽¹⁾

| Force N | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 | Essai 5 | Essai 6 | Observations |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| 360 | - | - | - | - | - | + | |
| 324 | - | - | - | - | - | - | |
| 288 | | | | | | | |
| 252 | | | | | | | |
| 240 | | | | | | | |
| 216 | | | | | | | |
| 192 | | | | | | | |
| 180 | | | | | | | |
| 168 | | | | | | | |
| 160 | | | | | | | |
| 144 | | | | | | | |
| 128 | | | | | | | |
| 120 | | | | | | | |
| 112 | | | | | | | |
| 108 | | | | | | | |
| 96 | | | | | | | |
| 84 | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | |
| 72 | | | | | | | |
| 64 | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | |
| 56 | | | | | | | |
| 54 | | | | | | | |
| 48 | | | | | | | |
| 42 | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

Positif (+) S'il se produit une explosion (crépitement, bruit intense ou inflammation),

Négatif (-) S'il se produit une décomposition (changement de couleur, dégagement d'odeur) ou aucune réaction.

Annexe 3
Fiche d'essais à l'épreuve d'impact : prélèvement 3
2 pages

FICHE D'ESSAIS - EPREUVE 3A)II): EPREUVE AU MOUTON DE CHOC BAM

Nota : ce document a été émis et est géré par DRA/ SUPP / MERC

| INFORMATIONS | | | | | |
|-----------------|----|-----------------|------------|---------------|----------------|
| Numéro d'essais | 35 | Date de l'essai | 29/09/2022 | N° Prestation | Nitrocellulose |

| RENSEIGNEMENTS SUR LE PRODUIT | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Nom du produit | Nitrocellulose Bergerac (Tube PVC) |
| Nom du client | BEARI |
| N° de réception | 22A1E002 |
| Date de réception | 17/08/2022 |
| Aspect | Nitrocellulose |

Préparation pour les échantillons solides :

- Substance pulvérulente est tamisée (maille de 0,5 mm)
- Substance comprimée, coulée ou condensée est désagrégée et tamisée (maille de 0,5 mm)
- Substance fabriquée sous forme de charges est testée sous forme de disques (pastilles) d'environ 4 mm de diamètre et 3mm d'épaisseur

Informations complémentaires

REFERENCES DES MATERIELS UTILISES

| | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Appareil Mouton de choc | M-A1-8009 | <input type="checkbox"/> | Chargette | M-A1-2043 |
| <input type="checkbox"/> | Jeu de pige/hausse | M-A1-0218 | <input type="checkbox"/> | Chargette | M-A1-2044 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bagues | 22AP585 | <input type="checkbox"/> | Chargette | M-A1-2045 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Etampes | 22AP584 | <input type="checkbox"/> | Chargette | M-A1-2046 |
| <input type="checkbox"/> | Tamis (maille de 0,5 mm) | M-A1- | <input type="checkbox"/> | Chargette | M-A1-2047 |
| <input type="checkbox"/> | | | <input type="checkbox"/> | | |

OPERATEUR(S)

| | | |
|----------------------------|---|---|
| Nom et Visa de l'opérateur | J. RASSON | N. Apchin |
| |  |  |

FICHE D'ESSAIS - EPREUVE 3A)II): EPREUVE AU MOUTON DE CHOC BAM

RESULTATS DES ESSAIS n°

(1)

| Energie d'impact (J) | Masse (kg) | Hauteur (cm) | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 | Essai 5 | Essai 6 | Observations |
|----------------------|------------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| 49 | 10 | 50 | | | | | | | |
| 39 | 10 | 40 | | | | | | | |
| 34 | 10 | 35 | | | | | | | |
| 30 | 5 | 60 | | | | | | | |
| 25 | 5 | 50 | | | | | | | |
| 20 | 5 | 40 | | | | | | | |
| 15 | 5 | 30 | | | | | | | |
| 10 | 5 | 20 | + | | | | | | Bruit/Odeur |
| 7 | 5 | 15 | | + | | | | | Bruit/Odeur |
| 5 | 1 | 50 | | | + | | | | Bruit/Odeur |
| 4 | 1 | 40 | | | | + | | | Bruit/Odeur |
| 3 | 1 | 30 | | | | | - | + | |
| 2 | 1 | 20 | | | | | | | |
| 1 | 1 | 10 | | | | | | | |

Positif (+) S'il se produit une explosion (avec bruit d'explosion plus ou moins fort ou inflammation),

Négatif (-) S'il se produit une décomposition (sans flamme, ni explosion) ou aucune réaction.

RESULTAT DE L'EPREUVE

| | | | | | |
|--|---|---|------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Energie limite d'impact ⁽¹⁾ : | 3 | J | Résultat : | <input type="checkbox"/> | Positif (Energie d'impact < 2 J) |
| | | | | <input checked="" type="checkbox"/> | Négatif (Energie d'impact > 2 J) |

(1) Energie d'impact la plus basse pour laquelle il a été observé au moins une « explosion » sur six essais

OBSERVATIONS

Annexe 4
Fiche d'essais à l'épreuve de frottement : prélèvement 4
2 pages

EPREUVE DE FROTTEMENT BAM - EPREUVE 3B)I)

Nota : ce document a été émis et est géré par DRA/ SUPP / MERC

INFORMATIONS

| | | | | | |
|-----------------|----|-----------------|------------|---------------|----------------|
| Numéro d'essais | 14 | Date de l'essai | 29/09/2022 | N° Prestation | Nitrocellulose |
|-----------------|----|-----------------|------------|---------------|----------------|

RENSEIGNEMENTS SUR LE PRODUIT

| | |
|------------------------------|--|
| Nom du produit | Nitrocellulose Bergerac (Tube démonté) |
| Nom du client | BEARI |
| N° de réception | 22A1E002 |
| Date de réception à L'INERIS | 17/08/2022 |
| Aspect | Nitrocellulose |

Préparation de l'échantillon :

- Substance pulvérulente est tamisée (maille de 0,5 mm)
 Substance comprimée, coulée ou condensée est désagrégée et tamisée (maille de 0,5 mm)
 Substance sous forme de pâte est testé à l'état sec si possible (sinon après avoir enlevé la plus grande partie de diluent)

Informations complémentaires

REFERENCES DES MATERIELS UTILISES

| | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|----------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Appareil à frottement | M-A1-8086 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2043 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Plaquettes de porcelaine | 15AG462 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2044 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Crayons de porcelaine | 09AH610 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2045 |
| <input type="checkbox"/> | Tamis (maille de 0,5 mm) | | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2046 |
| | | | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2047 |

CONTRÔLE AVANT ESSAI

- Vérification de l'équilibrage du bras de charge


RESULTAT DE L'EPREUVE

| | | | | |
|-------------------------------------|------------|----------|-------------------|---|
| Force limite⁽¹⁾ : | 360 | N | Résultat : | <input type="checkbox"/> Positif (Force limite < 80 N) |
| | | | | <input checked="" type="checkbox"/> Négatif (Force limite ≥ 80 N) |

⁽¹⁾ Force d'appui la plus basse pour laquelle il a été observé au moins une « explosion » sur six essais

OBSERVATIONS

OPERATEUR(S)

| | | |
|-----------------------------------|---|---|
| | J. RASSON | N. Apchin |
| Nom et Visa de l'opérateur |  |  |

EPREUVE DE FROTTEMENT BAM - EPREUVE 3B)I)

RESULTATS DES ESSAIS⁽¹⁾

| Force N | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 | Essai 5 | Essai 6 | Observations |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| 360 | - | - | - | - | - | - | |
| 324 | | | | | | | |
| 288 | | | | | | | |
| 252 | | | | | | | |
| 240 | | | | | | | |
| 216 | | | | | | | |
| 192 | | | | | | | |
| 180 | | | | | | | |
| 168 | | | | | | | |
| 160 | | | | | | | |
| 144 | | | | | | | |
| 128 | | | | | | | |
| 120 | | | | | | | |
| 112 | | | | | | | |
| 108 | | | | | | | |
| 96 | | | | | | | |
| 84 | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | |
| 72 | | | | | | | |
| 64 | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | |
| 56 | | | | | | | |
| 54 | | | | | | | |
| 48 | | | | | | | |
| 42 | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

¹ Positif (+) S'il se produit une explosion (crépitement, bruit intense ou inflammation),
Négatif (-) S'il se produit une décomposition (changement de couleur, dégagement d'odeur) ou aucune réaction.

Annexe 5
Fiche d'essais à l'épreuve d'impact : prélèvement 4
2 pages

FICHE D'ESSAIS - EPREUVE 3A)II): EPREUVE AU MOUTON DE CHOC BAM

Nota : ce document a été émis et est géré par DRA/ SUPP / MERC

INFORMATIONS

| | | | | | |
|-----------------|----|-----------------|------------|---------------|----------------|
| Numéro d'essais | 36 | Date de l'essai | 29/09/2022 | N° Prestation | Nitrocellulose |
|-----------------|----|-----------------|------------|---------------|----------------|

RENSEIGNEMENTS SUR LE PRODUIT

| | |
|-------------------|--|
| Nom du produit | Nitrocellulose Bergerac (Tube démonté) |
| Nom du client | BEARI |
| N° de réception | 22A1E002 |
| Date de réception | 17/08/2022 |
| Aspect | Nitrocellulose |

Préparation pour les échantillons solides :

| | |
|--------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> | Substance pulvérulente est tamisée (maille de 0,5 mm) |
| <input type="checkbox"/> | Substance comprimée, coulée ou condensée est désagrégée et tamisée (maille de 0,5 mm) |
| <input type="checkbox"/> | Substance fabriquée sous forme de charges est testée sous forme de disques (pastilles) d'environ 4 mm de diamètre et 3mm d'épaisseur |

Informations complémentaires

REFERENCES DES MATERIELS UTILISES

| | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|----------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Appareil Mouton de choc | M-A1-8009 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2043 |
| <input type="checkbox"/> | Jeu de pige/hausse | M-A1-0218 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2044 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bagues | 22AP585 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2045 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Etampes | 22AP584 | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2046 |
| <input type="checkbox"/> | Tamis (maille de 0,5 mm) | M-A1- | <input type="checkbox"/> | Chargeur | M-A1-2047 |
| <input type="checkbox"/> | | | <input type="checkbox"/> | | |

OPERATEUR(S)

| | | |
|----------------------------|---|---|
| | J. RASSON | N. Apchin |
| Nom et Visa de l'opérateur |  |  |

FICHE D'ESSAIS - EPREUVE 3A)II): EPREUVE AU MOUTON DE CHOC BAM

RESULTATS DES ESSAIS n°

(1)

| Energie d'impact (J) | Masse (kg) | Hauteur (cm) | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 | Essai 5 | Essai 6 | Observations |
|----------------------|------------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| 49 | 10 | 50 | | | | | | | |
| 39 | 10 | 40 | | | | | | | |
| 34 | 10 | 35 | | | | | | | |
| 30 | 5 | 60 | | | | | | | |
| 25 | 5 | 50 | | | | | | | |
| 20 | 5 | 40 | | | | | | | |
| 15 | 5 | 30 | | | | | | | |
| 10 | 5 | 20 | + | | | | | | Bruit |
| 7 | 5 | 15 | - | + | | | | | Bruit |
| 5 | 1 | 50 | + | | | | | | Bruit |
| 4 | 1 | 40 | - | + | | | | | Bruit |
| 3 | 1 | 30 | - | - | - | - | - | - | |
| 2 | 1 | 20 | | | | | | | |
| 1 | 1 | 10 | | | | | | | |

Positif (+) S'il se produit une explosion (avec bruit d'explosion plus ou moins fort ou inflammation),
Négatif (-) S'il se produit une décomposition (sans flamme, ni explosion) ou aucune réaction.

RESULTAT DE L'EPREUVE

| | | | | |
|--|---|---|------------|--|
| Energie limite d'impact ⁽¹⁾ : | 4 | J | Résultat : | <input type="checkbox"/> Positif (Energie d'impact < 2 J) |
| | | | | <input checked="" type="checkbox"/> Négatif (Energie d'impact > 2 J) |

⁽¹⁾ Energie d'impact la plus basse pour laquelle il a été observé au moins une « explosion » sur six essais

OBSERVATIONS

Annexe 6
Compte rendu d'essais DSC
5 pages

| | | | |
|------------------------------------|--|------------------------------------|--|
| Nom du RA | N. APCHIN | Client | SANOFI |
| Date de renseignement de la fiche | 12/10/2022 | Demande de travail faite par le RA | <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non |
| Code Prestation | 209316 | Contribution Labo | 209316 |
| Fiche de sécurité (FDS) disponible | <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non | Remarques : | |

| Rédacteur / Opérateur : | Peggy GRUEZ | | |
|---|----------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| <i>Nature des Produits</i> | N° d'échantillon (Léopard) | Quantité ou volume (g ou ml) | Famille de produit ou remarques |
| Résidu de nitrocellulose 1 – Tube démonté | 22A1E002-1 | 3 mg | Explosif |
| Résidu de nitrocellulose 2 – Tube PVC | 22A1E002-2 | 3 mg | Explosif |
| Résidu de nitrocellulose 3 – Résidu tube accident n°1 | 22A1E002-3 | 3 mg | Explosif |
| Résidu de nitrocellulose 4 – Résidu tube accident n°2 | 22A1E002-4 | 3 mg | Explosif |

| Essai n° : | Nom du produit | Masse d'échantillon (mg) | Condition de chauffe |
|-------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| DSC-4903 | Tube démonté | 2,2 | De 30 à 400°C à 5°C/min |
| DSC-4904 | Tube PVC | 2,9 | De 30 à 400°C à 5°C/min |
| DSC-4905 | Tube accident n°1 | 2,4 | De 30 à 400°C à 5°C/min |
| DSC-4906 | Tube accident n°2 | 2,7 | De 30 à 400°C à 5°C/min |

| DSC 131 EVO : | | | |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|
| Creusets utilisés : | Inox fermé <input checked="" type="checkbox"/> | Inox ouvert <input type="checkbox"/> | Autre <input type="checkbox"/> |
| Gaz utilisé : | Azote <input type="checkbox"/> | Air <input type="checkbox"/> | Autre <input type="checkbox"/> |
| Rampe de chauffe : | 5°C/min <input checked="" type="checkbox"/> | | Autre <input type="checkbox"/> |
| Température maximale : | 400°C <input checked="" type="checkbox"/> | 500°C <input type="checkbox"/> | Autre <input type="checkbox"/> |
| Balance utilisée n° :M-AE-0019 | | | |

Description de l'équipement

Le calorimètre 131 Evo

Le calorimètre DSC (Differential Scanning Calorimeter) mesure la différence de flux thermique dégagé entre un échantillon et une référence, lorsqu'ils sont placés dans un four et soumis à une loi de chauffe linéaire de la température ambiante à 400°C. Les résultats sont présentés sous forme de courbes appelée thermogramme. La température du four (en °C) est en abscisse et le flux de chaleur (en mW) en ordonnée. Un événement thermique tel qu'une transition de phase, un changement de chaleur spécifique, une réaction ou une décomposition chimique, se traduit par un pic sur le signal de l'acquisition de données (Figure 2). Ce pic peut être au-dessus ou au-dessous de la ligne de base traduisant respectivement une exothermie ou une endothermie.

L'amplitude de ce pic correspond à la puissance thermique libérée et sa surface représente l'énergie associée.

De cette façon, on peut :

- Mettre facilement en évidence tous phénomènes endothermiques ou exothermiques,
- Déterminer les températures auxquelles ont lieu ces phénomènes,
- Déterminer l'énergie associée à l'évènement thermique en intégrant la surface du pic.

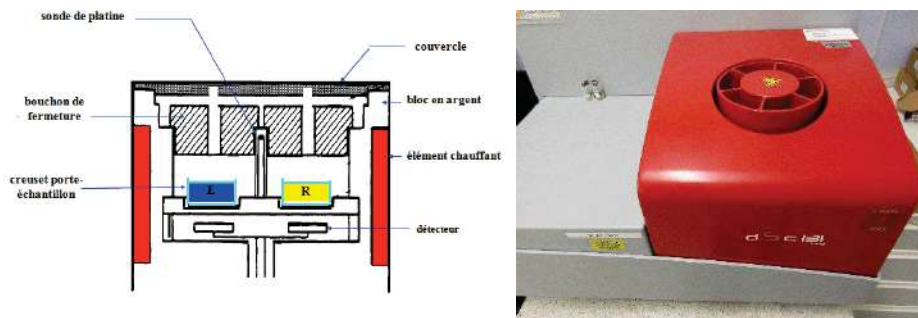


Figure 1 : Schéma et cliché photographique du calorimètre à balayage différentiel DSC 131 EVO.

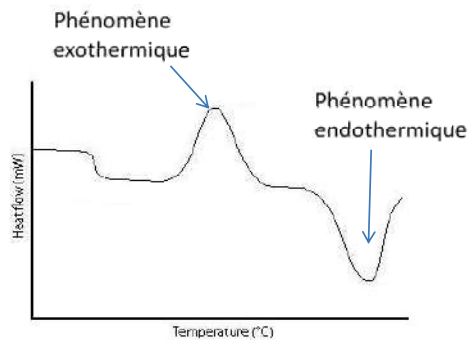


Figure 2 : Exemple de thermogramme obtenu en DSC.

Mode opératoire

L'échantillon à analyser a été introduit dans un creuset d'un volume de 30 µL. Le creuset a ensuite été placé dans un four et soumis à une chauffe de 5°C/min de la température ambiante jusqu'à 400°C.

DSC-4903

L'essai est réalisé avec 2,2 mg de résidu de nitrocellulose issu du tube démonté introduit dans un creuset inox F30 fermé sous air de l'ambiante à 400°C avec une rampe de chauffe de 5°C/min.

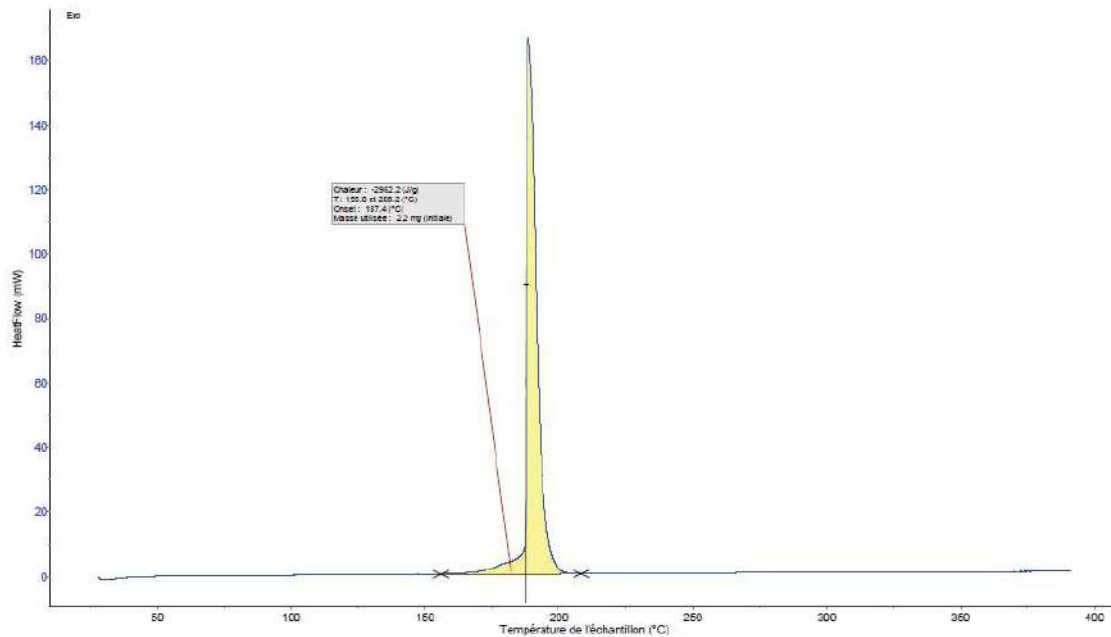


Figure 3 : Thermogramme de l'essai sur le résidu de nitrocellulose issu du tube démonté.

DSC-4904

L'essai est réalisé avec 2,9 mg de résidu de nitrocellulose issu du tube PVC introduit dans un creuset inox F30 fermé sous air de l'ambiante à 400°C avec une rampe de chauffe de 5°C/min.

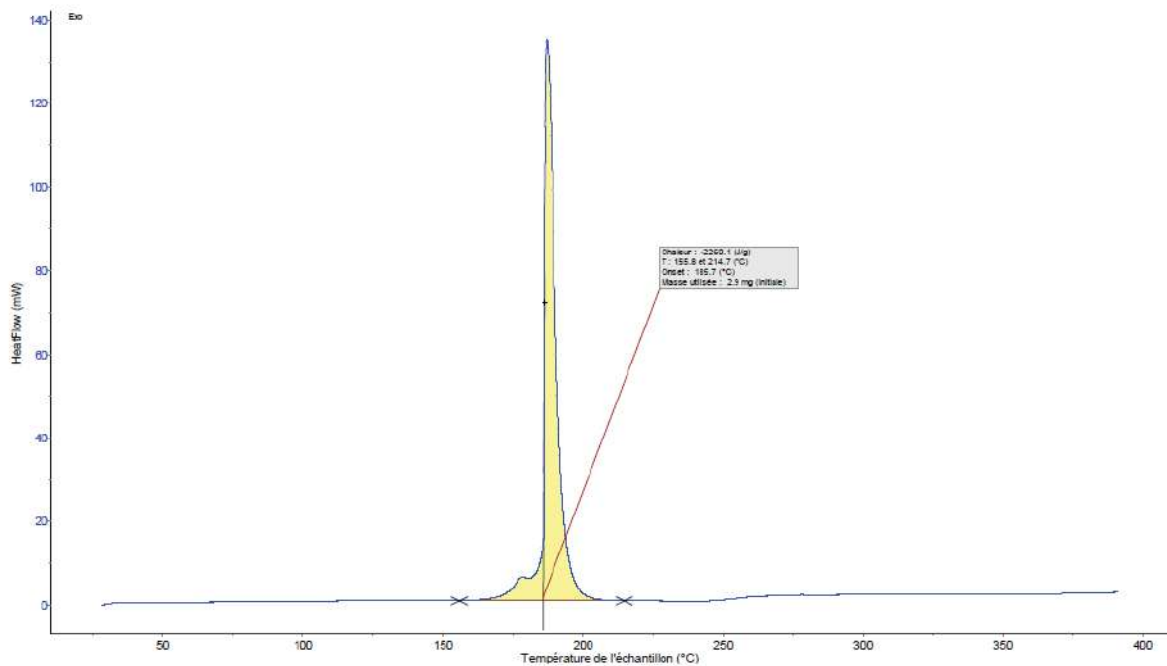


Figure 4 : Thermogramme de l'essai sur le résidu de nitrocellulose issu du tube PVC.

DSC-4905

L'essai est réalisé avec 2,4 mg de résidu de nitrocellulose issu du tube accident n°1 introduit dans un creuset inox F30 fermé sous air de l'ambiante à 400°C avec une rampe de chauffe de 5°C/min.

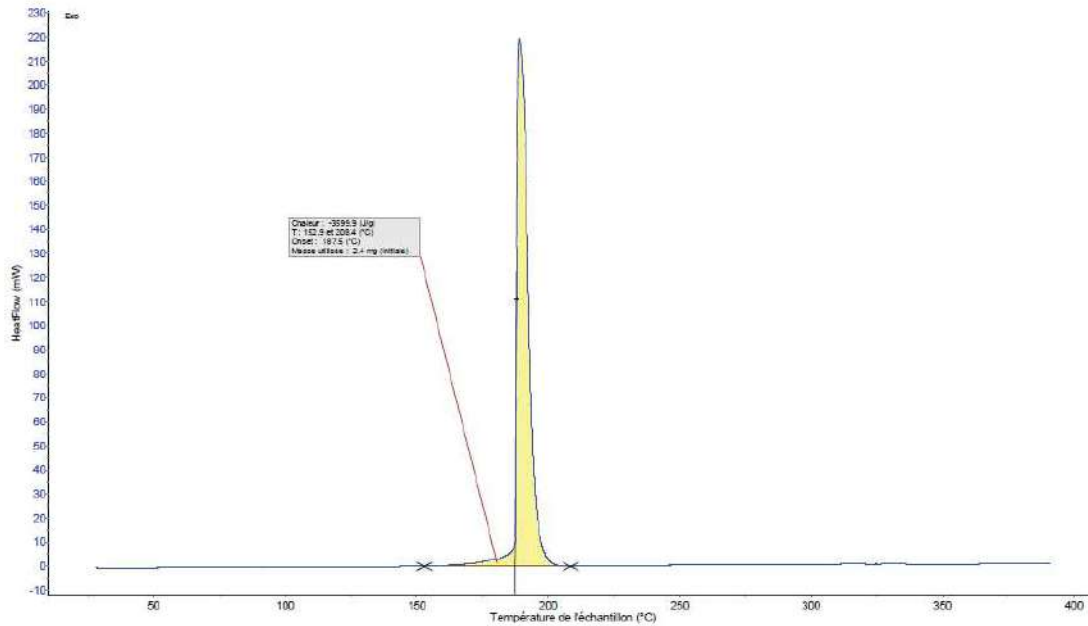


Figure 5 : Thermogramme de l'essai sur le résidu de nitrocellulose issu du tube accident n°1.

DSC-4906

L'essai est réalisé avec 2,7 mg de résidu de nitrocellulose issu du tube accident n°2 introduit dans un creuset inox F30 fermé sous air de l'ambiante à 400°C avec une rampe de chauffe de 5°C/min.

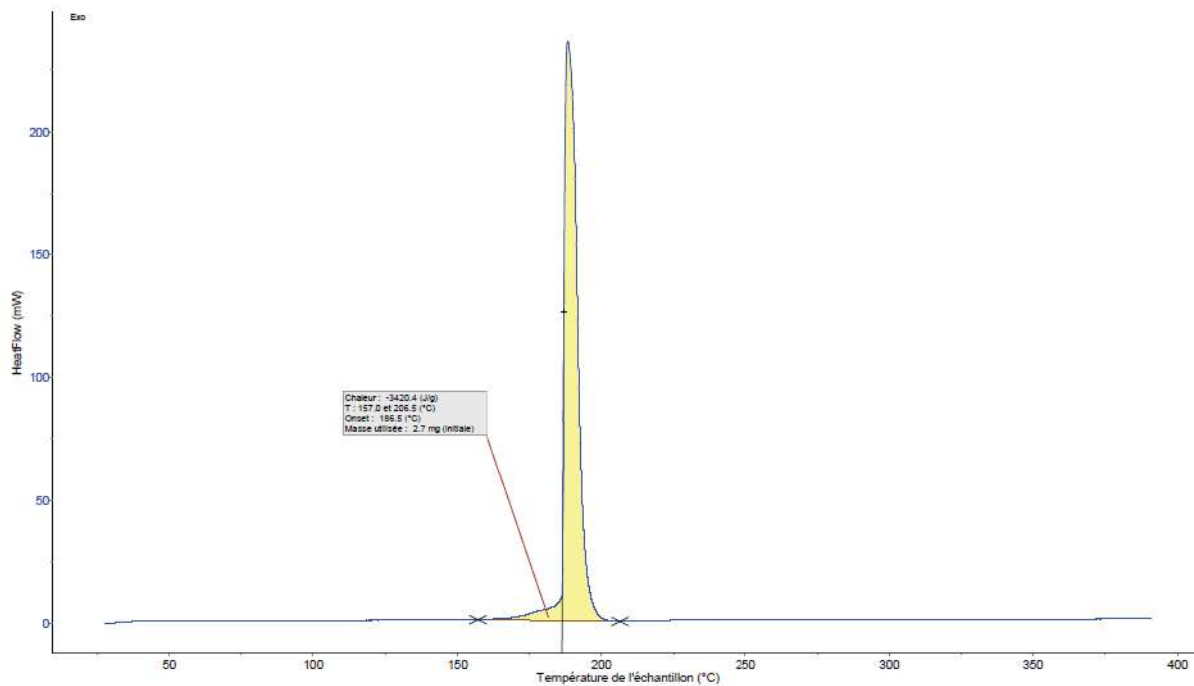


Figure 6 : Thermogramme de l'essai sur le résidu de nitrocellulose issu du tube accident n°2.

| Essai | Masse initiale (mg) | Plage de température (°C) | Energie dégagée (J/g) * | Observations |
|----------|---------------------|---------------------------|-------------------------|---|
| DSC-4903 | 2,2 | 156,0/208,2 | 2982 ± 142 | On observe une exothermie initiée vers 156°C et finissant vers 208°C avec une enthalpie totale de l'ordre de -2982 J/g. |
| DSC-4904 | 2,9 | 155,8/214,7 | 2260 ± 80 | On observe une exothermie initiée vers 156°C et finissant vers 215°C avec une enthalpie totale de l'ordre de -2260 J/g. |
| DSC-4905 | 2,4 | 152,9/208,4 | 3560 ± 155 | On observe une exothermie initiée vers 153°C et finissant vers 208°C avec une enthalpie totale de l'ordre de -3560 J/g. |
| DSC-4906 | 2,7 | 157,0/206,5 | 3420 ± 132 | On observe une exothermie initiée vers 157°C et finissant vers 207°C avec une enthalpie totale de l'ordre de -3420 J/g. |

Tableau 1 : Résultats des essais en DSC.

* L'incertitude de la mesure est liée à la précision de la pesée ± 0,1 mg.

En défaut d'air, on admet qu'une réaction thermique commence à devenir conséquente, en termes d'énergie libérée, à partir de -300 J/g.

Ces observations permettent d'admettre une réaction conséquente, en termes d'énergie libérée, des produits à partir d'environ 155°C.



Bureau d'enquêtes et d'Analyses sur les Risques Industriels

MTE / IGEDD / BEA-RI
Tour Séquoïa
92055 La Défense Cedex

+33 1 40 81 21 22
bea-ri.igedd@developpement-durable.gouv.fr

<https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/bea-ri-r549.html>