conseil général des Ponts et Chaussées

BEA-TT
Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre

les rapports

Enquête technique sur l'accident survenu sur la RN 165 à Nivillac (56) le 18 novembre 2003

Octobre 2005

Conseil Général des Ponts et Chaussées

Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre

31 octobre 2005

Rapport n°2003-0292-01

Enquête technique sur l'accident survenu sur la RN 165 à Nivillac (56) le 18 novembre 2003

Bordereau documentaire

Organisme(s) commanditaire(s) : Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, METLTM

Organisme(s) auteur(s) : Conseil Général des Ponts et Chaussées, CGPC
Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre, BEA-TT

Titre : Enquête technique sur l'accident survenu sur la RN 165 à Nivillac (56) le 18 novembre 2003

N°ISRN : EQ-BEATT—05-8--FR

Proposition de mots-clés : Accident, transport de matières dangereuses, enquête

Sommaire

Glossaire....4

Résumé....5

Introduction et organisation de l'enquête....7

1 L'accident et les secours....9

2 Scénario de l'accident....11

3 Les circonstances et les causes....13

3.1 Les entreprises 13
3.2 Les conducteurs 13
3.3 Travail et conduite 14
3.4 Les véhicules....14
3.5 L'explosion de la citerne....15

4 Caractéristiques de l'infrastructure routière et accidentologie locale....17

5 Les précédents en transport de matières dangereuses....19

6 Conclusions et recommandations....21

Annexes....23

Annexe 1 : La lettre de mission....25
Annexe 2 : Plan de situation....26
Annexe 3 : Photographie....27
Annexe 4 : Rapport d'expertise du LCPC....28
Annexe 5 : Rapport d'étude de l'Ecole des Mines de Douai/Armines....29
Annexe 6 : Accidents sur la RN 165 de 1996 à 2002....30
Annexe 7 : Références bibliographiques....31

Glossaire

- **ADR** : Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route
- **ASFA** : Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes et d'ouvrages à péage
- **BAU** *:* Bande d'Arrêt d'Urgence
- **BLEVE** *:* Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
- **DARQSI :** Direction de l'Action Régionale, de la Qualité et de la Sécurité. Industrielle
- **DDE** *:* Direction Départementale de l'Equipement
- **DRE** *:* Direction Régionale de l'Equipement
- **DRIRE** *:* Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
- **DGMT** *:* Direction Générale de la Mer et des Transports
- **DSCR :** Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière
- **ENSM** *:* Ecole Nationale Supérieure des Mines
- **FCOS** *:* Formation Continue Obligatoire de Sécurité
- **FIMO** *:* Formation Initiale Minimale Obligatoire
- **GESIP** *:* Groupe d'Etude de Sécurité des Industries Pétrolières et chimiques
- **GPL** *:* Gaz de Pétrole Liquéfié
- **LCPC** *:* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
- **MTMD :** Mission des Transports de Marchandises Dangereuses
- **SDIS** *:* Service Départemental d'Incendie et de Secours
- **TGI** *:* Tribunal de Grande Instance
- **TMD** *:* Transport de Marchandises Dangereuses
- **TPC** *:* Terre Plein Central
- **UVCE** *:* Unconfined Vapour Cloud Explosion
- **VL** *:* Véhicule Léger

Résumé

Le 18 novembre 2003, un ensemble frigorifique circulant sur la RN 165 dans le Morbihan dérive vers l'accotement droit puis traverse le terre-plein central de la quatre-voies et percute un camion citerne de GPL* arrivant en sens inverse.

La collision provoque le décès des deux conducteurs et l'embrasement de leurs véhicules. Après environ 20 minutes la citerne de GPL, partiellement remplie, fait explosion (BLEVE*) occasionnant 13 blessés.

L'enquête technique, qui a nécessité de longues investigations, permet d'attribuer la cause première de l'accident à un épisode d'hypovigilance du conducteur de l'ensemble frigorifique. Aucune anomalie concernant l'application des réglementations relatives au transport de matières dangereuses n'a été constatée.

Trois recommandations portant sur l'équipement des véhicules industriels pour alerter leurs conducteurs sur une dérive du véhicule, l'amélioration de la tenue au feu des citernes de transport d'hydrocarbures et celle de la signalétique des transports de matières dangereuses, ont néanmoins été émises.

* terme figurant dans le glossaire

Introduction et organisation de l'enquête

Le 18 novembre 2003 survenait à Nivillac (Morbihan) sur la RN 165 une collision entre deux poids-lourds ; leur embrasement provoquait l'explosion de la citerne de gaz de pétrole liquéfié (GPL) dont l'un d'eux était chargé. Cet accident a occasionné le décès des deux conducteurs et treize blessés parmi ses témoins.

Le 26 novembre 2003, la réalisation d'une enquête technique, entrant dans le cadre de la loi n°2002-3 du 3 janvier 2002 sur la sécurité des infrastructures et systèmes de transport, était demandée par M. le Ministre de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer au CGPC.

Les enquêteurs techniques se sont rendus sur les lieux à plusieurs reprises afin, en particulier, de rencontrer M. le Procureur de la République prés le TGI* de Vannes (qui les a autorisés à avoir communication de l'enquête préliminaire et à avoir accès aux épaves des véhicules), ainsi que M. le Directeur de Cabinet de M. le Préfet du Morbihan, les officiers de gendarmerie chargés de l'enquête judiciaire, les représentants de la DDE* et de la DRIRE*.

Ils ont également bénéficié du concours de la mission Matières Dangereuses de la DTT, des services Transport des DRE* des Pays de la Loire et du Centre, ainsi que de celui de l'Inspection du Travail des Transports et de la DRIRE de Bretagne.

Enfin une expertise de la citerne de GPL, confiée conjointement par le juge d'instruction et le BEA-TT au LCPC* et à l'école des Mines de Douai (ENSM*), a été rendue en avril 2005 ; elle éclaire l'origine et le mécanisme de l'explosion de la citerne de GPL.

* terme figurant dans le glossaire

1 L'accident et les secours

Le 18 novembre 2003 vers 16h50, un semi-remorque frigorifique de la société Lasternas d'Objat (19), circulant sur la RN 165 à la hauteur de la Roche-Bernard (56) dans la direction de Vannes, quitte soudainement sa voie de circulation, traverse le terre plein central de la quatre voies et va heurter un camion citerne de GPL de l'entreprise Masuy de Donges (44) se dirigeant en sens inverse.

L'embrasement des deux poids-lourds est immédiat et interdit aux témoins de porter secours aux deux conducteurs, gravement blessés ou tués dés cette collision.

Les secours, prévenus par un appel à 16h56, nécessiteront au total 17 véhicules spécialisés et 80 sapeurs pompiers arrivés en vagues successives, dont un détachement du SDIS* 44.

Les deux passagers d'un véhicule de la gendarmerie, de passage en retour de mission, établissent un premier périmètre de sécurité vers 17h.

Quelques minutes après, vers 17h10, alors que les premiers véhicules des pompiers arrivent en se frayant difficilement un chemin du fait de l'embouteillage provoqué par l'accident, les témoins entendent un fort sifflement immédiatement suivi par l'explosion de la citerne de GPL (boule de feu, souffle et projection de débris jusqu'à environ 300m).

L'intervention des pompiers sera compliquée du fait de l'extension prise par l'incendie des deux camions et des broussailles proches de la chaussée, ainsi que de la difficulté d'identifier – dans un premier temps – la nature exacte des produits transportés dans la citerne (c'est la découverte, dans les débris éparpillés, du carnet de bons de chargement du camion citerne, puis d'une plaque d'identification du produit, qui permettra d'identifier un transport de GPL).

La collision, puis l'explosion, provoqueront le décès des deux conducteurs ainsi que 13 blessés (dont 2 gendarmes et 2 pompiers), dont 4 graves, par brûlures et traumatismes sonores, ainsi que des dégâts sur les véhicules les plus proches (pare-brise cassés).

La RN 165 restera fermée prés de trois jours pour remise en état.

* terme figurant dans le glossaire

2 Scénario de l'accident

Les recherches menées par la Gendarmerie, dans le cadre de l'enquête judiciaire, à partir des traces, témoignages et autres éléments disponibles, permettent de reconstituer l'accident avec un haut degré de certitude en dépit de la destruction des véhicules et de leurs dispositifs d'enregistrement embarqués.

Vers 16h50, le semi-remorque frigorifique chargé de 21 palettes de biscuits destinées à être livrées le lendemain dans une grande surface de Landerneau et de 102 colis de confitures à livrer à Morlaix dans le Finistère le même jour (tracteur Mercedes immatriculé 1866 RW 19 et remorque METACO immatriculée 7002 RN 19) de l'entreprise Lasternas qui se dirige vers Vannes sur la RN 165, par un temps faiblement pluvieux, avec une bonne visibilité et un trafic fluide, et qui vient de doubler peu avant un autre ensemble routier à une vitesse estimée aux environs de 90 km/h, franchit le sommet d'une faible côte ; en s'engageant dans une descente modérée, et en sortant d'une courbe de large rayon à droite, le semi-remorque mord progressivement la BAU* puis l'accotement sans heurter le talus de déblai haut de plusieurs mètres, sur sa droite.

Le conducteur tente alors de reprendre le contrôle de la trajectoire et son coup de volant lance l'ensemble dans un angle prononcé à gauche, ce qui lui fait franchir, déjà en déséquilibre, les glissières du TPC*, puis heurter à l'avant gauche un camion citerne immatriculé 9316 ZR 44 exploité par la société Masuy, qui se dirige en sens inverse vers Nantes ; ce malgré l'ultime tentative d'évitement du conducteur du camion citerne qui se serre sur la BAU.

Les deux camions (la remorque frigo de Lasternas est alors couchée) prennent tout de suite feu, alors que les deux conducteurs sont sans connaissance ou déjà décédés.

Très rapidement plusieurs petites explosions (réservoirs de carburant ou d'air) se produisent, puis, environ 20 minutes après la collision, un très fort sifflement précède immédiatement l'explosion de la citerne de GPL (de retour de livraisons incomplètes, elle contenait encore 3150 litres de GPL, pour une contenance totale de 22500 litres).

Cette dernière explosion , qui occasionne 13 blessés essentiellement par brûlures, parfois graves, par ses caractéristiques (projection des débris jusqu'à 300 m, parfois à plusieurs dizaines de mètres de morceaux de la citerne, dont un fond de cuve de plusieurs centaines de kg, boule de feu vue à des kilomètres, effet thermique et de souffle) semble s'apparenter plutôt à un BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) qu'à un UVCE* (Unconfined Vapour Cloud Explosion) qui sont les 2 grandes catégories où sont rangés de tels phénomènes (cf. en particulier l'étude citée en bibliographie « Les accidents de gaz liquéfié – le BLEVE » réalisée en 1991 par le GESIP*).

A noter qu'un premier témoignage a fait croire aux sauveteurs qu'il s'agissait d'une citerne de bitume, ce qui montre, une fois de plus, la difficulté d'identifier correctement, lors d'un accident grave avec des véhicules en feu, la nature exacte des produits transportés dans une citerne. Lors des carambolages accompagnés d'incendies de Mirambeau en 1993, ou de Coulombiers en 2002, sur l'A10, les mêmes difficultés d'identification ont été éprouvées par les pompiers à l'égard des citernes impliquées, les plaques et documents réglementaires étant inaccessibles ou détruits.

Quant aux raisons de la perte de contrôle de l'ensemble routier de la société Lasternas, plusieurs causes envisageables peuvent être écartées au vu des vérifications et expertises effectuées : ce sont l'usage du téléphone portable, la traversée de la route par un animal ou la gêne occasionnée par un autre usager, l'état de la chaussée, une défaillance technique du véhicule ou de ses pneus.

* terme figurant dans le glossaire

Bien que l'alcoolémie ou la toxicologie du conducteur n'aient pu être vérifiées, pas plus que ses occupations pendant les quelques heures entre sa dernière livraison et l'accident, ni l'hypothèse d'un malaise ou geste intempestif du conducteur, le caractère très progressif de la sortie de route à droite et la tentative brutale de rattrapage ultérieure évoquent plus vraisemblablement un épisode d'hypovigilance suivi par la réaction instinctive d'un conducteur insuffisamment expérimenté, d'autant plus anxieux d'éviter l'accident qu'il avait déjà effectué quelques semaines avant une autre sortie de route avec d'assez gros dégâts supportés par son employeur (cf. point 3.2).

Ce constat rejoint les observations de l'ONISR sur les accidents de poids-lourds (étude sur 2003 : PL et sécurité routière) où l'on relève que sur 107 passagers de PL tués en 2003 (dont 97 conducteurs) **62 l'ont été dans des accidents n'impliquant que le PL** ; dans de tels cas (essentiellement suite à des sorties de route en ligne droite) le facteur principal est un épisode d'hypovigilance dont la survenance gagnerait à être mieux prévenue, et signalée par des moyens embarqués notamment du type de ceux qu'offrent certains constructeurs automobiles par le moyen de dispositifs d'alerte de franchissement latéral de lignes blanches.

On peut noter par ailleurs que c'est la tentative brutale de rattrapage qui est à l'origine de la perte de contrôle et du franchissement de TPC ; il apparaît *a posteriori* qu'il aurait mieux valu laisser le semi-remorque terminer sa course sur l'accotement droit, où il n'y avait pas d'obstacle très dangereux.

Ce bilan aurait pu être beaucoup plus grave si plusieurs facteurs ne l'avaient réduit :

- « petites » explosions des réservoirs de carburant ou d'air des camions se produisant très rapidement après l'embrasement initial, ce qui a eu pour effet de dissuader les témoins de s'approcher de prés ;
- présence rapide de 2 militaires de la gendarmerie qui font s'écarter les témoins ;
- disposition de la remorque frigorifique couchée qui a dévié le souffle vers le talus le plus proche ;
- situation des chaussées entre 2 talus élevés et en forte pente ; à l'écart de l'agglomération (cependant, la maison la plus proche a eu des vitres soufflées et le toit d'un garage perforé par un débris métallique de bonne taille).

3 Les circonstances et les causes

Les causes et circonstances susceptibles d'avoir occasionné ou aggravé cet accident sont approfondies ci-après ; elles relèvent ici de 5 catégories :

3.1 Les entreprises

L'entreprise Lasternas existe depuis 1961 ; elle est installée à Objat en Corrèze et inscrite aux registres des entreprises de transport routier de marchandises et de commissionnaires de transport tenus par la DRE Limousin. En décembre 2002, elle comptait 62 véhicules-moteurs et employait 73 conducteurs ; ses 70 licences communautaires et 3 licences intérieures sont principalement utilisées pour du transport de lots en trafic national, essentiellement en primeurs et produits frais. Fin 1999, Lasternas a fait l'objet de sanctions administratives pour non-respect de la réglementation sur les temps de conduite et de repos ; de nombreuses infractions avaient été constatées lors d'un contrôle en entreprise faisant suite à un grave accident en août 1998 sur le périphérique parisien. Depuis lors, l'entreprise ne s'est plus signalée par des faits similaires.

L'entreprise Masuy a été crée en 1971 ; son siége est à Couëron (44) et son centre d'exploitation principal à Donges (44). Elle fait actuellement partie du groupement E B TRANS. Son effectif est de 162 salariés dont 142 conducteurs ; elle dispose de 127 véhicules tracteurs, 19 porteurs et 177 semi-remorques. Certifiée ISO 9001 pour le transport de matières dangereuses, son activité est le transport public routier de produits pétroliers et la location de véhicules industriels, elle détient les inscriptions et licences correspondants délivrés par la DRE Pays de la Loire. En transport de gaz liquéfié, Masuy a une activité de distribution régionale, au départ des dépôts de Donges, Lorient et Brest, pour le compte de plusieurs sociétés pétrolières. Cette entreprise dispose bien du « conseiller à la sécurité » requis pour le transport de matières dangereuses ; ce dernier a rendu le rapport exigible sur l'accident en cause. Les contrôles dont elle fait régulièrement l'objet montrent un bon respect des réglementations du transport routier.

3.2 Les conducteurs

Le conducteur de l'ensemble de la société Lasternas a 35 ans et demi ; embauché dans l'entreprise le 24 février 2003 après avoir exercé les métiers de boulanger puis d'ouvrier en papeterie, il est formé, dans le cadre d'un contrat de qualification, dans un centre de formation de Brive la Gaillarde où il passe les permis C et E (C) en mai 2003 puis la FIMO*. Il n'était autonome au volant de son camion que depuis le 1er juillet 2003.

L'analyse des disques retraçant ses activités en septembre et octobre 2003, outre des infractions sur les temps de conduite, fait apparaître de nombreux excès de vitesse semblant correspondre à des « roulettes » en descente ; à noter que son activité était majoritairement de nuit entre la Corrèze et Rungis.

Par ailleurs, le 6 octobre 2003, l'intéressé a fait une sortie de route qui s'est terminée dans un champ avec des dégâts conséquents pour son ensemble routier, le même (mais correctement réparé entre temps) que lors de l'accident du 18 novembre 2003.

Il était en repos puis en congé de paternité du 26 octobre au 11 novembre 2003 inclus.

Le conducteur du camion-citerne de la société Masuy a 35 ans et demi ; salarié de cette entreprise depuis le 15 juin 1998, il détient les permis C, D et E depuis avril 1989, la FIMO depuis avril 1998 et la FCOS* depuis le 12 mars 2003; il possède aussi le certificat de formation ADR*, valable jusqu'au 14 juin 2004, l'habilitant à conduire des véhicules de transport de GPL en citerne.

* terme figurant dans le glossaire

Il effectue une tournée quotidienne de livraison de GPL en citerne à partir de Donges à des clients d'ANTARGAZ. En congés du 11 au 14 novembre, l'analyse de ses disques du 17 novembre et de la semaine précédant ses congés montre un complet respect des temps de conduite et de repos, et des vitesses enregistrées ne dépassant pas 80 km/h.

3.3 Travail et conduite

Les disques de chronotachygraphe ayant évidemment été détruits, on peut reconstituer comme suit les activités des deux conducteurs :

- pour ce qui concerne le conducteur de Lasternas, il est parti d'Objat (siége de l'entreprise) le 17 novembre à 17 h, après 3 jours de repos, pour Nantes (environ 6 h de conduite) où il devait effectuer des livraisons chez 3 clients le 18 novembre matin.

A 12h30 le 18 novembre, il quittait son dernier client à St Etienne de Montluc (44) ; c'est l'heure de son dernier contact avec Lasternas.

Il devait ensuite se diriger vers Landerneau et Morlaix (29) où il devait livrer le mercredi 19 novembre à partir de 8 h.

Les 270 km environ du trajet vers Landerneau pouvaient donc se faire avec un laps de temps suffisamment large pour éviter toute urgence inutile.

Malgré les recherches de la Gendarmerie, il n'a pas été possible de savoir ce que ce conducteur a fait entre St Etienne de Montluc et le lieu de l'accident (une cinquantaine de km qui ont été parcourus en environ 4 heures…).

- le conducteur de Masuy, pour sa part, avait fini sa journée de travail le 17 novembre à 18h45.

Le 18 novembre, après avoir chargé 14800 litres de gaz dans sa citerne en environ trois quarts d'heure, il quittait Donges pour effectuer une tournée de livraison chez 13 clients entre Herbignac (44) et Plescop (56). Selon ANTARGAZ, il aurait bien livré 11646 litres et il lui restait donc, lors de l'accident, environ 3150 litres à livrer.

Les données ci-dessus ne font donc pas apparaître, pour aucun des deux conducteurs en cause, ni d'infractions établies, ni d'éléments susceptibles d'avoir contribué, par une fatigue excessive récente ou autre, au déclenchement du processus qui s'est achevé par l'accident.

3.4 Les véhicules

- l'ensemble exploité par la société Lasternas est composé d'un tracteur MERCEDES, type A 1840 LSE 36 E, appartenant à la société CPLP de Brive la Gaillarde (19) ; il est immatriculé 1866 RW 19, mis en circulation le 12 avril 2000. Son PTAC est de 18250 kg.

Sa dernière visite technique annuelle a été passée sans observations le 13 janvier 2003 et il comptait alors 364903 km.

La remorque frigorifique de marque METACO, type SD 3380, appartient à Lasternas ; elle est immatriculée 7002 RN 19 et a été mise en circulation le 27 juin 1999. Son PTAC est de 34000 kg. Sa dernière visite technique annuelle est du 10 février 20003 et a été passée sans observations.

- le camion-citerne utilisé par Masuy comporte un porteur RENAULT, type 22 ACA 1DC 204, appartenant à Babin Chevaye (groupe Masuy) de Couëron (44) ; immatriculé 9317 ZR 44 et mis en circulation le 16 octobre 1997, il a un PTAC de 19000 kg. Il dispose d'un certificat d'agrément ADR délivré en dernier lieu le 17 octobre 2003 par la DRIRE

Pays de la Loire. Ses dernières visites techniques (code de la route et ADR) ont été passées le 19 août 2003 avec la mention « accepté » ; ce véhicule avait alors 229625 km.

La citerne portée de marque GUHUR, type CCG9723, a été fabriquée en 1997. Elle a été éprouvée à 25 bars, pour une pression maxi de service de 19 bars. A un seul compartiment, elle a été agrée sous le n° MRD-T-97-064-26V pour le transport de matières dangereuses : RTMDR classe 2 chapitre 2°F ; en fait, elle ne transportait que du GPL (n°CEE-ONU 1965) ;

Mise en service le 16 septembre 1997, elle répondait déjà aux prescriptions de l'arrêté ADR du 5 décembre 1999.

A noter que ce type de citerne est dépourvu de soupape.

Sa dernière inspection périodique est du 29 juillet 2003, et la dernière épreuve d'étanchéité a été subie le 6 août 2003 ; l'une et l'autre, ainsi que l'épreuve hydraulique, n'ont révélé aucune défectuosité.

A ce stade, il convient donc de remarquer que toutes les réglementations techniques sont respectées et que **l'ensemble des réglementations applicables au transport de matières dangereuses, particulièrement exigeantes, sont ici scrupuleusement appliquées dans leurs diverses composantes** (entreprise, exploitation, formation du conducteur, véhicule et citerne).

3.5 L'explosion de la citerne

L'expertise réalisée par le LCPC et l'école des Mines de Douai à la demande du BEA-TT et du juge d'instruction (cf. copie en annexe au rapport), permet de confirmer que cette explosion est bien caractérisée par un « BLEVE » (voir en bibliographie). Celui-ci est la conséquence de l'exposition de la citerne à l'incendie ayant suivi la collision, qui a échauffé en premier lieu la partie basse de la citerne au niveau du joint soudé entre les viroles.

La partie extérieure de ce joint, non recuit comme le permettait la norme applicable lors de la construction de la citerne, a rompu par un phénomène classique de fissuration au réchauffage. L'épaisseur restante n'a pu contenir la pression interne et a cédé, permettant la fuite de gaz par cet orifice, fuite accompagnée du fort sifflement décrit par les témoins.

La dépressurisation brutale qui a suivi, a permis la vaporisation instantanée du propane liquide restant dans la citerne, créant ainsi une violente surpression et la propagation de la déchirure.

Un moyen de retarder la rupture d'un réservoir en de telles circonstances est donc bien de prévoir une exigence de recuit des soudures d'une citerne destinée au transport d'hydrocarbures liquides, ainsi que la réglementation du transport de matières dangereuses l'exige depuis le 1er janvier 1998 (postérieurement à la construction de la citerne en cause).

La tenue au feu des citernes devrait cependant pouvoir être encore améliorée par une protection calorifuge extérieure de celles-ci ; éventuellement, l'usage de soupapes (possible réglementairement mais pas pratiqué) devrait être envisagé à nouveau, en tenant compte des éventuels inconvénients d'une telle soupape dans d'autres cas possibles d'accident.

4 Caractéristiques de l'infrastructure routière et accidentologie locale

Dans la zone de l'accident la RN 165 est récente (mise en service en 1996).

La perte de contrôle du semi-remorque frigorifique s'est produite sur la fin d'une section rectiligne, en pente d'environ 4%, avant un virage à gauche de rayon 900 m vers le viaduc de la Vilaine. Elle se situe environ 500 m après un point haut de cette section rectiligne, dans une zone où le conducteur pouvait avoir une bonne perception du tracé.

Le profil en travers, à 2X2 voies avec séparateur central, offre également de bonnes caractéristiques avec une bande d'arrêt d'urgence (BAU) de 2,50 m suivie d'une berme non revêtue de 1 m ; la « marche » de 5 à 10 cm entre la BAU et la berme correspond à la hauteur de la couche de roulement.

La chaussée est en bon état et les équipements (glissières de sécurité) n'appellent pas de remarque particulière.

L'accidentalité a été observée sur une zone de 1 km (500 m de part et d'autre du point concerné), sur la période 1996-2002 soit 7 ans. Elle fait apparaître 2 accidents corporels, survenus à 500 m environ dans le virage situé à l'aval du lieu de l'accident du 18/11/2002, ainsi qu'une dizaine d'accidents matériels.

Ces constats peuvent être rapprochés des ratios observés sur les autoroutes concédées (ce n'est pas le cas de la RN 165, mais celle-ci a cependant des caractéristiques quasiment autoroutières): ainsi l'ASFA* recense sur ce réseau autoroutier, dont le trafic moyen est comparable à celui de la RN 165, environ 0,4 accident corporel et 2 à 3 accidents matériels par kilomètre et par an. Dans la zone concernée, la RN 165 apparaît ainsi aussi sûre sinon plus sûre qu'une autoroute « moyenne ».

D'une manière générale, les statistiques établies par l'ASFA pour les autoroutes concédées font apparaître que les accidents avec franchissement de séparateur central restent peu nombreux mais sont souvent graves: ils représentent 1% des accidents corporels mais 2,7% des accidents mortels ; dans 60% des cas ces accidents avec franchissement de séparateur impliquent au moins 1 PL.

Dans ces conditions, il n'apparaît pas d'anomalie liée à l'infrastructure qui soit susceptible d'expliquer l'accident.

* terme figurant dans le glossaire

5 Les précédents en transport de matières dangereuses

Une étude réalisée en 2001 par EADS, à la demande de la DTT/MD, permet de rappeler brièvement le contexte de l'accidentologie routière du transport de matières dangereuses (en particulier de produits pétroliers) en France sur 5 ans (1996 à 2001) ; voir références en bibliographie.

Il faut d'abord mentionner que sur les prés de 110 millions de tonnes de produits pétroliers transportés en France en 2000, 55% (soit plus de 60 millions de tonnes) le sont par la route, dont les 2/3 pour les livraisons terminales.

Sur les 190 accidents (matériels compris) de transport routier de MD constatés en moyenne par an, un peu plus de 13% en moyenne concernent le transport de GPL (pour un accident sur deux de TMD* concernant les hydrocarbures).

En grande majorité ces accidents se produisent hors agglomération ; l'instabilité des citernes (ballant) en est souvent la cause.

Les accidents les plus significatifs sont les suivants :

- le 21/8/96 à Divonne les Bains, lors d'une livraison de GPL dans un hôtel, une fuite se produit ; l'explosion qui suit cause le décès du livreur et la destruction de plusieurs immeubles.
- le 8/9/97 à Port Sainte Foy, la collision entre un train et un semi-remorque citerne chargé de plus de 30000 litres de carburants, à un passage à niveau, fait 12 morts et 43 blessés, ainsi que d'importants dégâts matériels.
- le 29/9/97 à Bourg Achard, une série de carambolages sur autoroute, dus au brouillard, impliquent un camion citerne de carburant, vide mais non dégazé, dans lequel plusieurs autres usagers vont s'encastrer en provoquant un embrasement général ; le bilan sera de 10 morts et 70 blessés.
- le 14/8/98 à la Ferté Bernard sur l'autoroute A 11, un camion citerne transportant 32000 litres de carburants est percuté par un véhicule léger qui tente de le doubler sur la droite par la BAU.La collision provoque le renversement de la citerne et l'incendie des deux véhicules, faisant 3 morts (les deux conducteurs et le passager du VL*).
- le 9/5/2000 à Bordes, un camion chargé de 777 bouteilles de GPL s'arrête à un dépôt et le conducteur constate alors un feu d'essieu ; malgré les efforts du conducteur, le feu se propage à tous les pneus et provoque l'explosion de plusieurs dizaines de bouteilles de GPL ; les dégâts matériels seront très importants sur les immeubles et véhicules à proximité.
- le 21/7/2000 à Charroux, un camion citerne chargé de 31000 litres de carburants se renverse dans une courbe, dans la traversée du village. L'incendie qui suit fait un mort (le conducteur), 5 blessés parmi les habitants et détruit trois maisons.
- le 4/8/2000 à Toulon, un camion citerne chargé de 16000 litres de carburants emprunte un tunnel routier situé en agglomération, en dépit des interdictions ; il s'encastre dans l'entrée du tunnel et prend feu. Il n'y aura que des dégâts matériels lourds sur le tunnel.

Cette énumération des accidents les plus graves survenus en 5 ans, fait apparaître qu'ils concernent surtout les citernes de transport de carburants (essence, fioul…) lors de collisions ou pertes de contrôle, suivies d'une fuite puis de l'incendie des produits transportés.

Bien que lors de l'accident de Nivillac le camion-citerne de GPL n'ait eu qu'un rôle purement passif, il s'apparente cependant à cette même typologie.

* terme figurant dans le glossaire

6 Conclusions et recommandations

Les constats et analyses énoncés ci-dessus permettent de formuler les recommandations suivantes :

Recommandation R1 (DSCR*) :
L'étude, en vue d'une généralisation sur les véhicules industriels neufs, de dispositifs permettant de signaler aux conducteurs le franchissement latéral de bandes blanches, tels que déjà offerts par certains constructeurs automobiles, devrait améliorer la prévention des cas trop fréquents de sortie de route dus à l'hypovigilance des conducteurs.

Recommandation R2 (DGMT/MTMD* et DARQSI*) :
L'amélioration de la tenue, face à un feu, des citernes de transport d'hydrocarbures devrait être recherchée par l'étude de dispositifs de protection externe adaptés (tôle de protection, isolant thermique…) et le réexamen de l'opportunité du recours à des soupapes de sécurité.

Recommandation R3 (DGMT/MTMD) :
Les incertitudes des services de secours sur la nature exacte du danger encouru, lors d'accidents routiers du type de celui étudié ici, nécessitent d'étudier l'amélioration de la signalétique applicable à ces transports, notamment par l'utilisation des possibilités offertes par les nouvelles technologies télématiques.

* terme figurant dans le glossaire

Annexes

Annexe 1 : Lettre de mission

Annexe 2 : Plan de situation

Annexe 3 : Photographie

Annexe 4 : Rapport d'expertise du LCPC

Annexe 5 : Rapport d'étude Ecole des Mines de Douai/Armines

Annexe 6 : Accidents sur la RN 165 de 1996 à 2002

Annexe 7 : Références bibliographiques

Annexe 1 : La lettre de mission

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

2003-0292-01

La Défense, le 26 NOV. 2003

Le ministre de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer

à

Monsieur le Vice-Président du Conseil général des ponts et chaussées

ministère
de l'Équipement
des Transports,
du Logement,
du Tourisme
et de la Mer

objet : Enquête technique sur un accident de la route

Le 18 novembre 2003, un accident impliquant un véhicule articulé et un camion-citerne de transport de gaz de pétrole liquéfiés vide s'est produit sur la route nationale 165 sur le territoire de la commune de MARZAN (Morbihan). La collision des deux véhicules lourds impliqués suivie d'un incendie et d'une explosion a causé la mort des deux conducteurs de véhicules lourds et blessé plusieurs autres personnes.

Compte tenu des circonstances et des conséquences particulières de cet accident, et en application de la loi n° 2002-3 du 3 janvier 2002, je vous demande de bien vouloir diligenter dans les meilleures délais à une enquête technique afin de déterminer les circonstances et les causes de tels accidents.

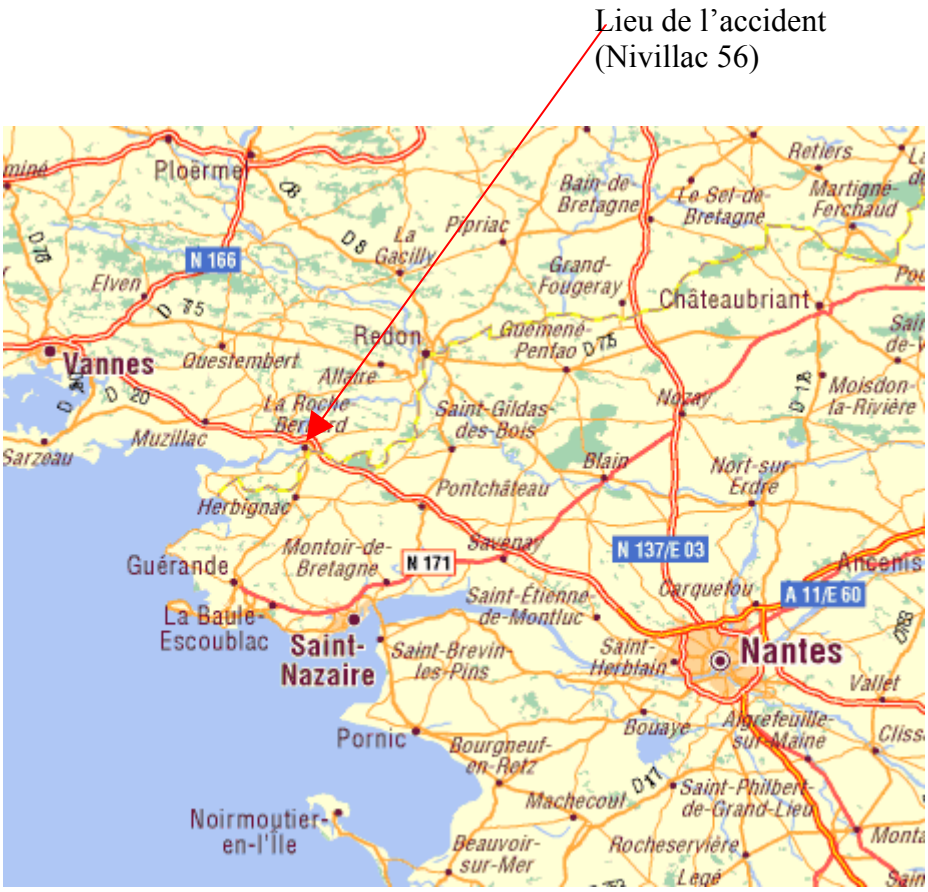
L'enquête technique s'attachera à comprendre les facteurs à l'origine de la collision ainsi que les raisons expliquant l'explosion de la citerne. Elle formulera s'il y a lieu toute recommandation de sécurité utile pour améliorer la prévention des accidents.

Pour le Ministre et par délégation
Le Directeur des Transports Terrestres

Patrice RAULIN

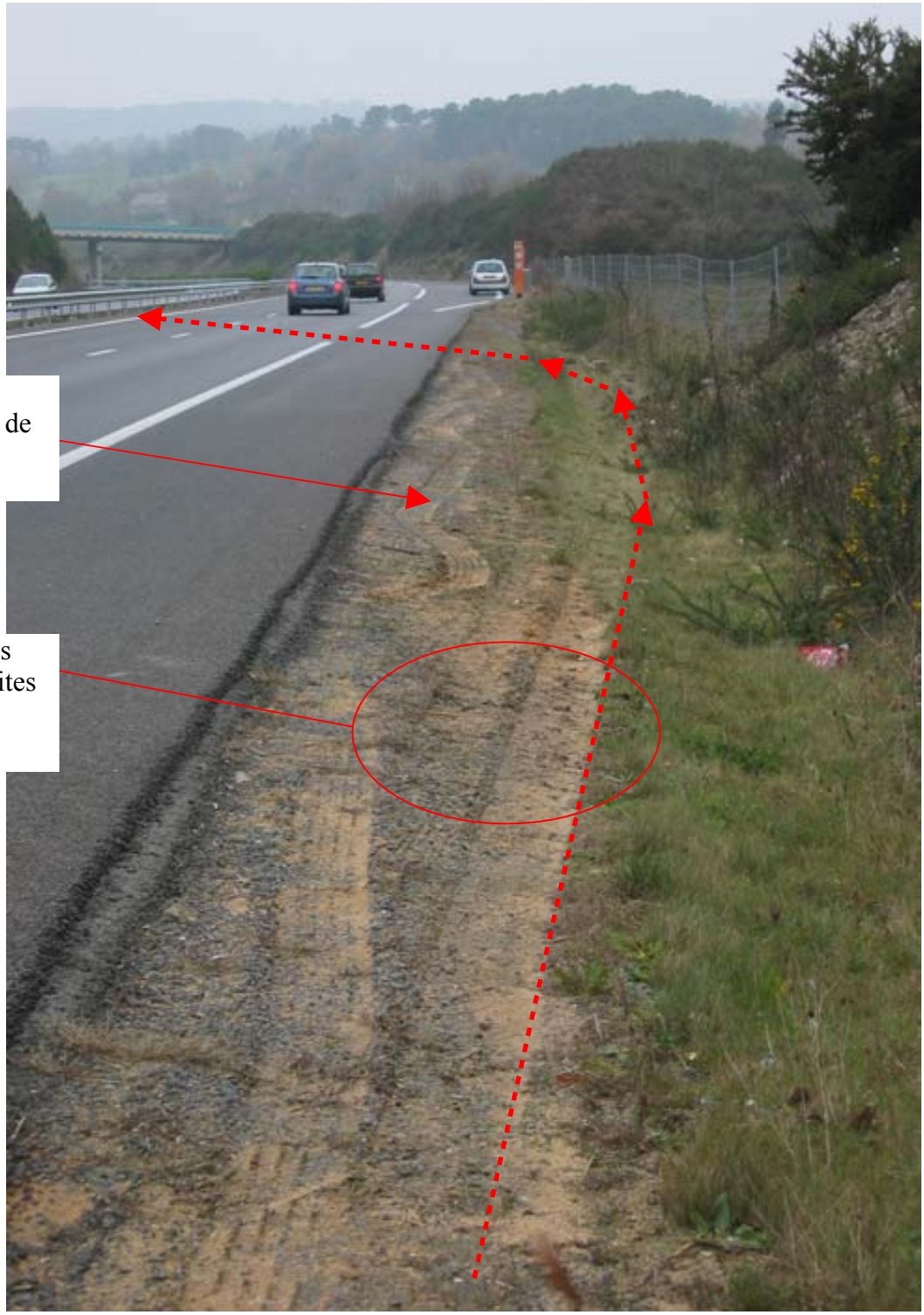
Arche Sud
92055 La Défense cedex
téléphone :
01 40 81 21 22
mél : dtt@equipement.gouv.fr

Annexe 2 : Plan de situation



© Michelin 2005
© Tele Atlas

Annexe 3 : Photographie



Trace du semi-remorque sur l'accotement avant la traversée du terre plein central

Trajectoire du semi-remorque

Annexe 4 : Rapport d'expertise du LCPC

LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Centre de Nantes
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais Cedex

Division métaux, armatures et câbles pour ouvrages d'art

BREVET Pierre
E.C.L. - Docteur Ingénieur

Adjoint au Chef de Division

Téléphone : 33 (0)2 40 84 59 47
Télécopie : 33 (0)2 40 84 59 92
Mél : pierre.brevet@lcpc.fr
Site Web : www.lcpc.fr

Compte-rendu d'examens et relevés géométriques

Accident de NIVILLAC (novembre 2003)
Expertise de la citerne GPL après explosion

Demandeurs :	- Ministère de l'Equipement Bureau Enquête Accident Transports Terrestres - Ministère de la Justice Tribunal de Grande Instance de Vannes 22 bis place de la République 56000 VANNES
Date des commandes :	- 05.08.2004 - n° BCD4008412 BEATT - 15.09.2004 - N° 04003813 Ministère de la Justice : ordonnance de commission d'expert
Matériel :	Citerne de gaz de pétrole liquéfié type CCG9723 accidentée à Nivillac le 18 novembre 2003 Marque GUHUR Référence de la citerne : CCG 9723-05
Lieu de dépôt :	Entreprise BOCENO – 56190 Arzal
Responsables d'examens :	P. BREVET A. MOUFTIEZ
N° Activité :	33H 04 P73
Affaire :	C 297
Références :	PB/MMC 2005-071
Date :	23 mars 2005
Page :	1/10

Etablissement public à caractère scientifique et technologique

N° 9915173 pour les sites de Paris et de Nantes

Paris (siège)
58, Boulevard Lefebvre
75732 Paris Cedex 15

Marne-la-Vallée

Satory-Versailles

I – Objet des missions (annexe 1)

L'objet de la mission confiée aux experts :

- Monsieur P. BREVET du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), et
- Madame A. MOUFTIEZ de l'Ecole des Mines de Douai,

par le Tribunal de Grande Instance de Vannes et celui de l'expertise commandée par le Bureau Enquête Accidents Transports Terrestres, est de déterminer par des investigations techniques les phases qui ont conduit, au cours de l'accident et de l'incendie qui a suivi, à l'explosion de la citerne de gaz de pétrole liquéfié impliquée dans l'accident du 18.11.2003 à NIVILLAC (56), puis de proposer d'éventuelles modifications à porter aux citernes pour éviter leur explosion ou en prévenir les effets.

II – Procédure

Après accord (reçu le 17 septembre 2004) donné pour l'examen et la réalisation de prélèvements sur les scellés :

– scellés n° 4 : carcasse calcinée de l'ensemble routier 1866 RW 19 et 7002 RN 19,
– scellés n° 5 : carcasse calcinée du citernier Renault 9316 ZR 44,

les experts se sont rendus sur le site de stockage des scellés les 21 et 23 Septembre, 12 et 20 octobre et le 9 novembre 2004 pour préparer l'intervention d'une grue, extraire les éléments de citerne et les disposer pour reconstituer cette structure puis, pour relever les informations susceptibles de répondre à la mission, pour effectuer des mesures (cotes, épaisseurs), pour définir les prélèvements de matériau et, finalement, pour effectuer ces prélèvements.

La totalité des prélèvements a été, après conditionnement, transférée à l'Ecole des Mines de Douai pour analyses, essais et examens. Les matériaux ont été reçus en laboratoire le 28 octobre 2004.

Les schémas joints montrent l'emplacement des prélèvements. L'annexe photographique donne des vues des 6 coupons d'acier prélevés par le LCPC.

III – Plans de la citerne

Le plan de masse du camion citerne est donné sur les figures 1, 2 et 3 (annexe 1).

IV – Résultats des observations faites sur site après mise en place des éléments de la citerne

Le 12 octobre 2004, la citerne était en cinq morceaux. Des découpes au chalumeau avaient été pratiquées pour le transport du lieu de l'accident au site de stockage.

Les observations confirment le rapport d'enquête (pièce D119) de l'Industrie et des Mines.

La virole de la citerne (partie cylindrique) s'est ouverte suivant une génératrice située à proximité de son support gauche sur le véhicule porteur puis s'est déroulée. Les deux fonds ont été séparés de la virole par déchirement du métal (mode III de rupture). Le fond elliptique arrière était entièrement détaché alors que le fond avant restait solidaire de la tôle déployée par une bande d'environ 25 cm qui a ensuite été découpée. Une coupe des tôles déployées de la virole a également été pratiquée. Cette coupe (proche de la soudure circonférentielle) a séparé l'élément en trois morceaux.

Les schémas 4, 5 et 6 donnent les résultats de la reconstitution de la virole (schéma 1) des fonds (schéma 2) et les positions des prélèvements (schéma 3). [Sur ces schémas et sur les photographies, les deux tôles formant la virole ont été appelées « grande virole » et « petite virole » en référence à leurs largeurs non égales].

Sur les schémas 4 et 5 est également reportée la zone sur laquelle les peintures ont été détruites par la chaleur (ou les flammes). Il est à remarquer qu'avant l'explosion, seul le tiers inférieur côté gauche de la citerne avait été soumis aux effets de l'incendie (de la génératrice basse de la citerne au début du pare-soleil). Les résultats des essais de l'Ecole des Mines de Douai indiquent que cette zone a été portée à une température supérieure ou égale à 300°C.

Les ruptures sont également dessinées sur la citerne du plan de la figure 7.

Le mode de rupture est en grande partie le mode III (cisaillement par sollicitation parallèle au fond d'entaille selon les conventions de la mécanique de la rupture). La propagation des « déchirures » affecte le métal de base et non les cordons de soudure (le cisaillement a été précédé d'une légère plastification relevée dans le rapport de l'Ecole des Mines).

La rupture est de mode I (traction avec déformation plastique et striction avant rupture) sur une longueur d'environ 84 centimètres. Cette zone affecte une « génératrice » de la virole située au droit de l'essieu arrière, à environ 20 centimètres du support de la citerne, à gauche du porteur (figure 4).

La soudure circulaire solidarisant les deux tôles constitutives de la virole est située au tiers de cette zone environ, elle est donc rompue dans le sens transversal.

La zone de rupture purement ductile est encadrée par deux zones de rupture mixte (traction / cisaillement) de 25 et 11 cm (figure 4).

La virole est constituée de deux tôles soudées avec un décalage d'environ 60 centimètres. Cette soudure, sur la citerne, est circonférentielle.

Les soudures longitudinales qui ferment la virole étaient placées proches de la génératrice supérieure de la citerne (partie haute sous le pare-soleil).

Les soudures d'angle des profilés en T, qui permettaient la fixation des brises flots internes en aluminium, n'ont pas provoqué de fissuration.

Les brise-flots en alliage d'aluminium ont été brisés. Ils n'ont pas été identifiés dans le dépôt de matériaux stockés.

Le pare-soleil en alliage d'aluminium a été arraché de la citerne. Les tôles constitutives froissées, retrouvées, ne portent pas de trace d'effet de l'incendie.

Aucune des fixations d'équipements n'a été arrachée (trou d'homme, piquage, soupape de vidange, …).

Les supports de la citerne sont restés fixés à celle-ci. Les attaches au châssis se sont rompues soit lors du choc soit au moment de l'explosion.

V – Observations faites sur le châssis

Le choc initial entre le tracteur et le citernier s'est produit sur l'avant gauche de la cabine de ce dernier, provoquant la déformation de la poutrelle gauche du châssis au droit du moteur (figure 8).

Les restes du châssis du camion citerne (voir annexe photographique) présentent une très forte déformation sur le côté gauche en avant de l'essieu arrière.

Dans cette zone, le longeron gauche est couché et le longeron droit est soulevé (figure 9).

Sur le train de roues jumelles gauches, seule la jante extérieure est écrasée alors que la jante de la roue intérieure est pratiquement intacte (figure 10).

La figure 11 montre la partie arrière peu déformée (par le choc et par l'explosion).

On peut en déduire que l'impact final (à l'arrêt des deux véhicules sur la bande d'arrêt d'urgence) du tracteur du semi-remorque s'est produit en avant de l'essieu arrière de la citerne, au milieu de la citerne elle-même. C'est cette position finale qui a été relevée sur les rapports de la Gendarmerie et de la DRIRE.

Le support de la citerne a pu dans cette phase être arraché de la gauche du châssis et la citerne soulevée et inclinée sur la droite du véhicule tout en restant en appui sur le tracteur du semi-remorque.

VI – Analyse de la phase du choc incendie – explosion

Compte-tenu des observations faites sur le châssis, la collision peut être envisagée selon les phases suivantes :

- Premier contact latéral du tracteur sur le côté de la cabine du porteur (déformation du châssis au niveau du moteur).
- Déplacement du citernier sur la droite.
- Le tracteur continue son mouvement et s'encastre contre la citerne en avant de l'essieu arrière sur lequel il s'arrête. Le citernier est poussé vers la droite hors de la chaussée.
- Le glissement latéral de l'ensemble citernier / tracteur s'arrête sur la bande d'arrêt d'urgence.
- La citerne est enfoncée dans la zone d'arrêt du tracteur. Aucune déchirure n'est créée.
- Le tracteur prend feu puis l'incendie se communique aux parties combustibles du flan gauche du citernier : pneus, réservoir* de gazoil, garde boue, matières plastiques et bois (voir annexe A3).
- Les flammes et le rayonnement de l'incendie du tracteur réchauffent la citerne.

Nota : le tracteur de la semi-remorque est resté droit sur ses roues d'après les témoignages retenus dans le rapport de gendarmerie.

Les phases de fissuration et explosion sont décrites dans le rapport de l'Ecole des Mines.

* Le réservoir de gazoil a sans doute été écrasé dans la collision.

VII – Contrôle des matériaux

VII – 1 – Epaisseurs

Des mesures des épaisseurs des tôles des viroles et des fonds ont été pratiques (méthode par ultra-sons, coupes, palmer, micromètres).

Les schémas ci-après donnent les épaisseurs relevées i : sur la virole, ii : sur le prélèvement 5, iii : sur le prélèvement 6.

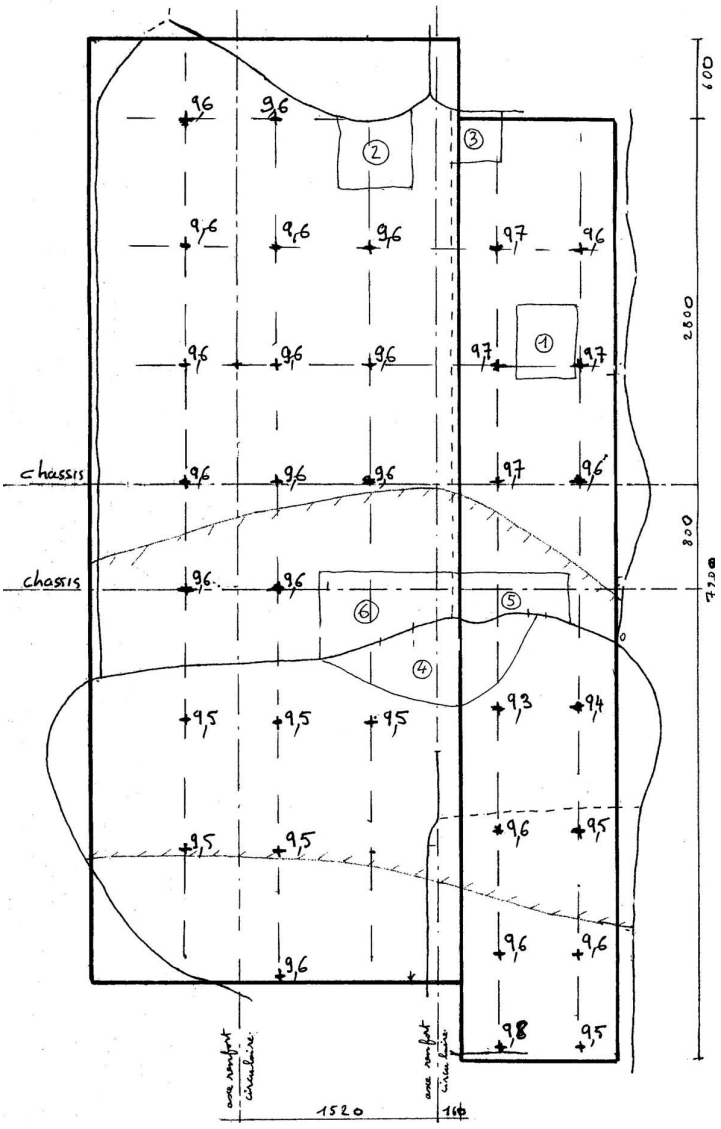


Schéma 1 :

Vue développée de la virole, position et valeurs des mesures d'épaisseur (en mm) effectuées sur site.

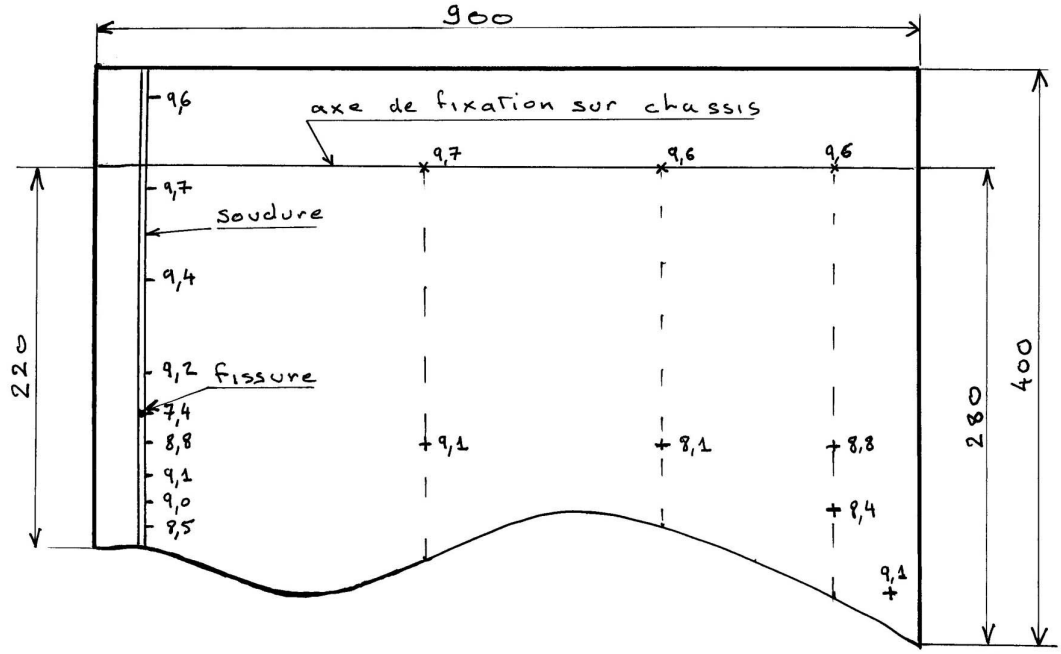


Schéma 2 :

Prélèvement 5 comportant l'amorce de rupture. Positions et valeurs des épaisseurs (mm). On remarque qu'à proximité d'une fissure du cordon de soudure circulaire de la virole, la tôle s'est déformée.

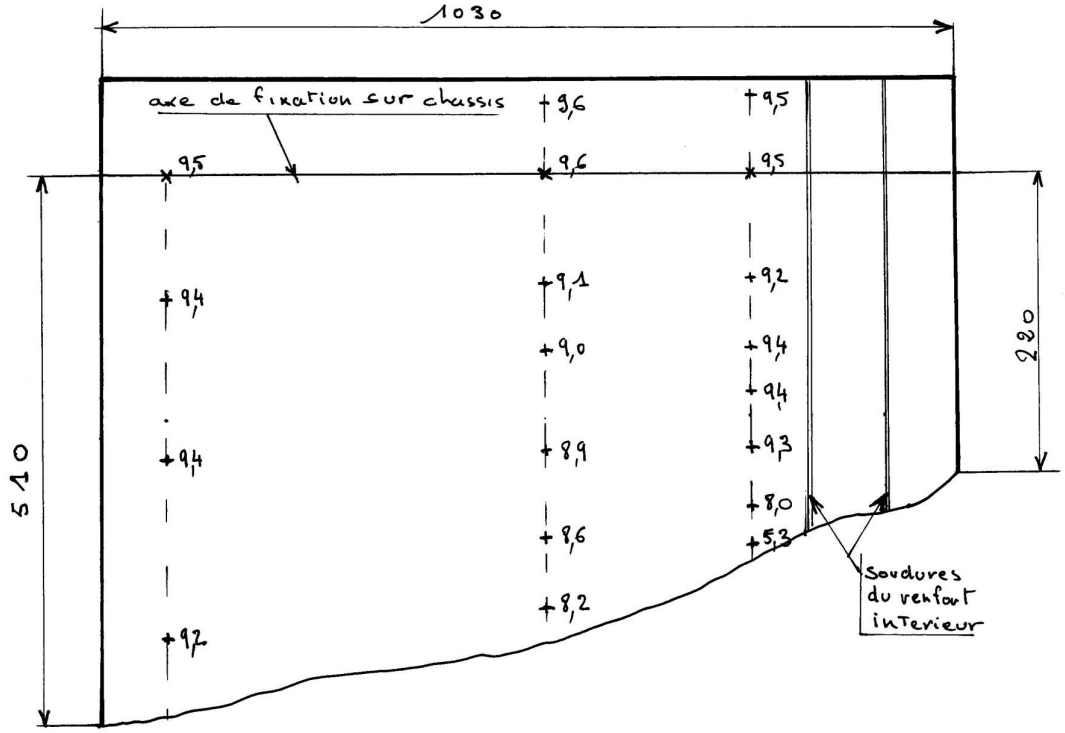


Schéma 3 :

Prélèvement 6 comportant le début de propagation ductile de la fissure. Positions et valeurs des épaisseurs (en millimètres).

Dans la majeure partie de la citerne, les épaisseurs des tôles sont égales ou supérieures aux épaisseurs prévues (9,1 et 9,8 mm). La zone de rupture ductile correspond à des pertes d'épaisseurs localisées sur une vingtaine de centimètres de part et d'autre de la ligne de rupture.

Les tôles, à proximité des ruptures par cisaillement, ont également subi un allongement plastique local avec réduction de section avant « déchirure » (figure 12) (voir rapport de l'Ecole des Mines).

VII – 2 – Identification des produits

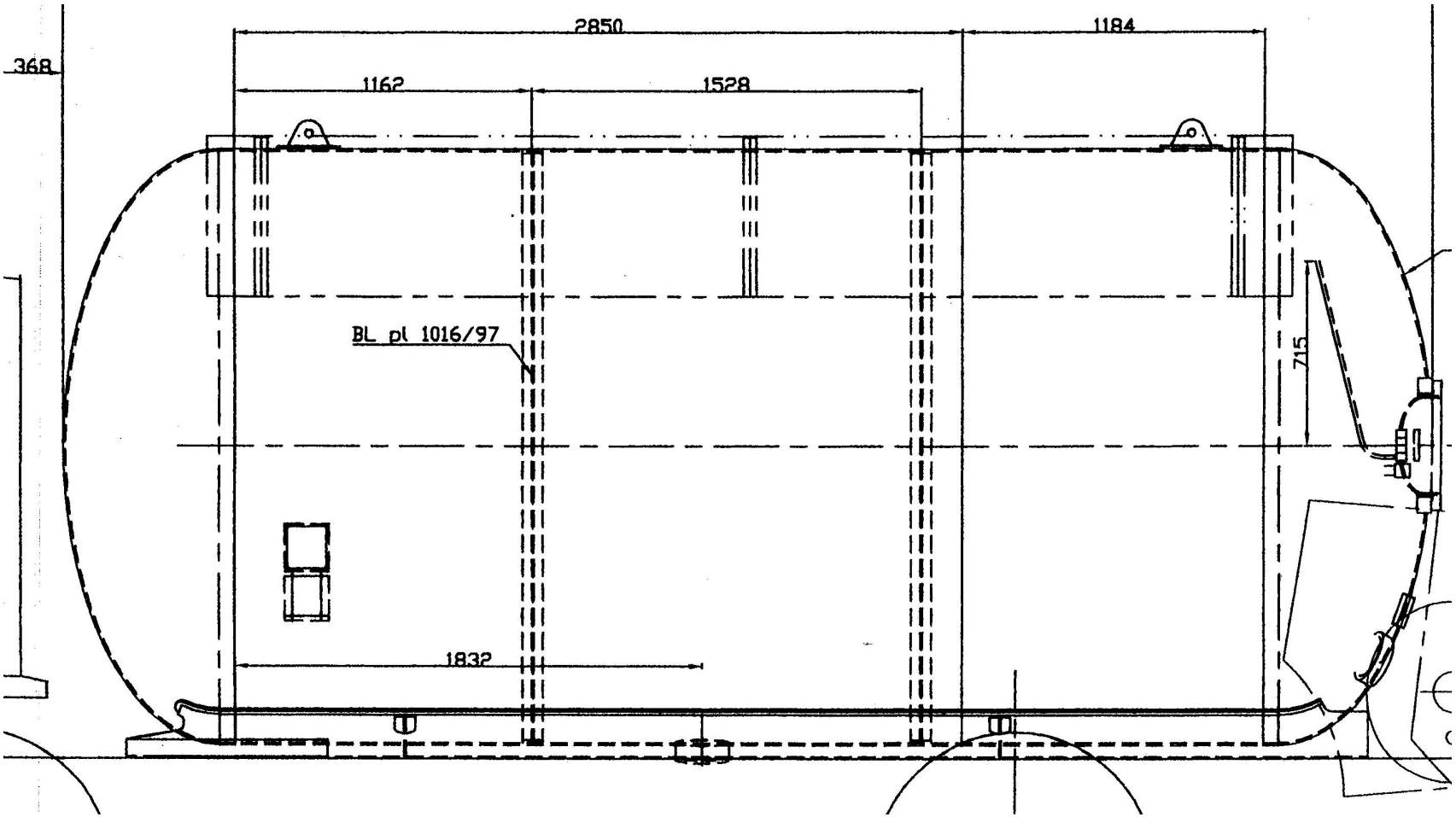
Sur la face interne de la tôle la plus large constitutive de la virole, l'identification du produit était encore déchiffrable. Le numéro de tôle a été retrouvé sur le certificat 3.1.B. du dossier de construction de la citerne [tôle 750 105 – coulée 092 671 – brame 223 (copie certificat joint)].

ANNEXES

1ère Partie

(9 pages)

Figures 1 à 11



<u>Figure 1</u> : Plan de masse de la citerne et de son porteur. Vue de gauche. A noter : l'existence d'un pare-soleil et la position de la soudure entre les tôles constituant la virole par rapport à l'essieu arrière.

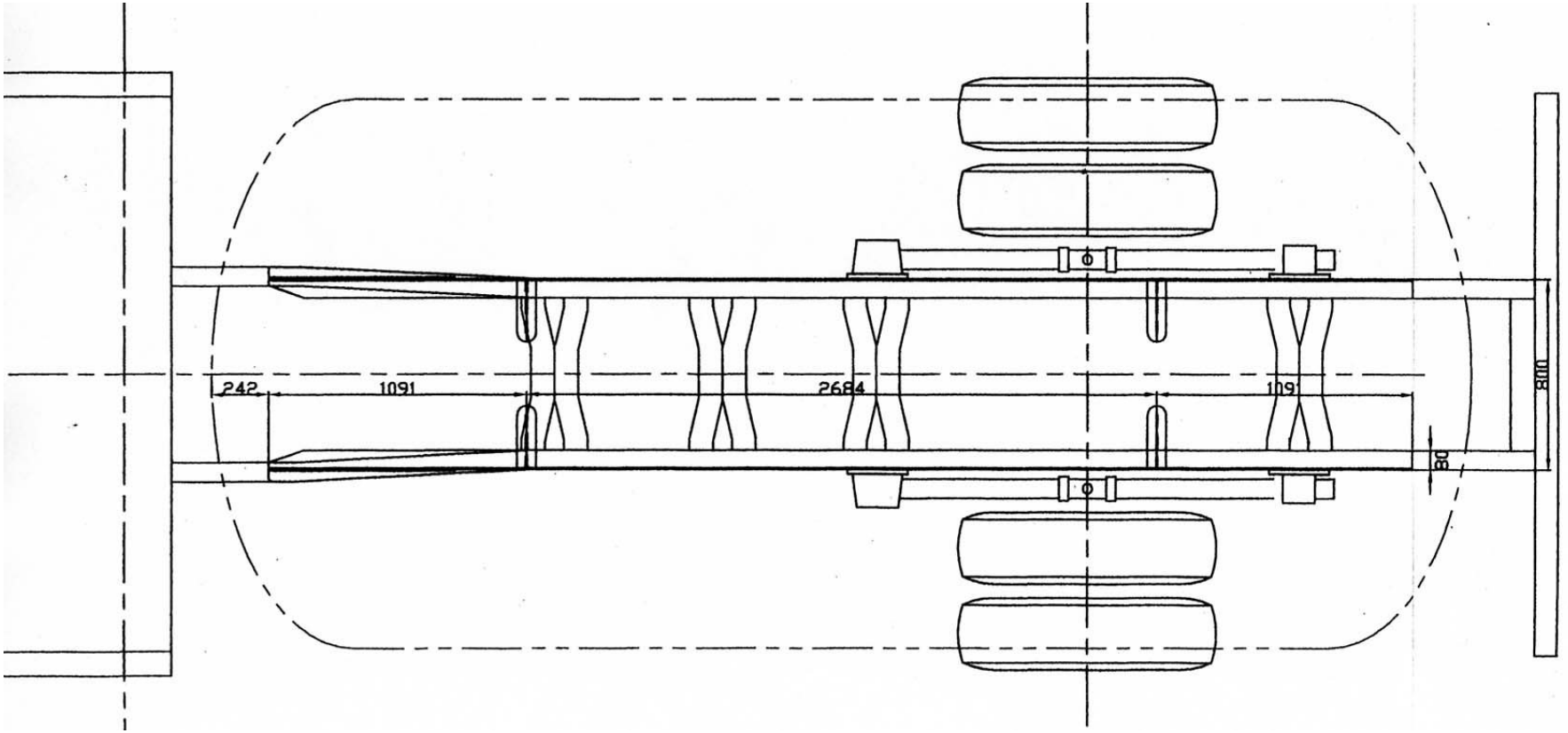
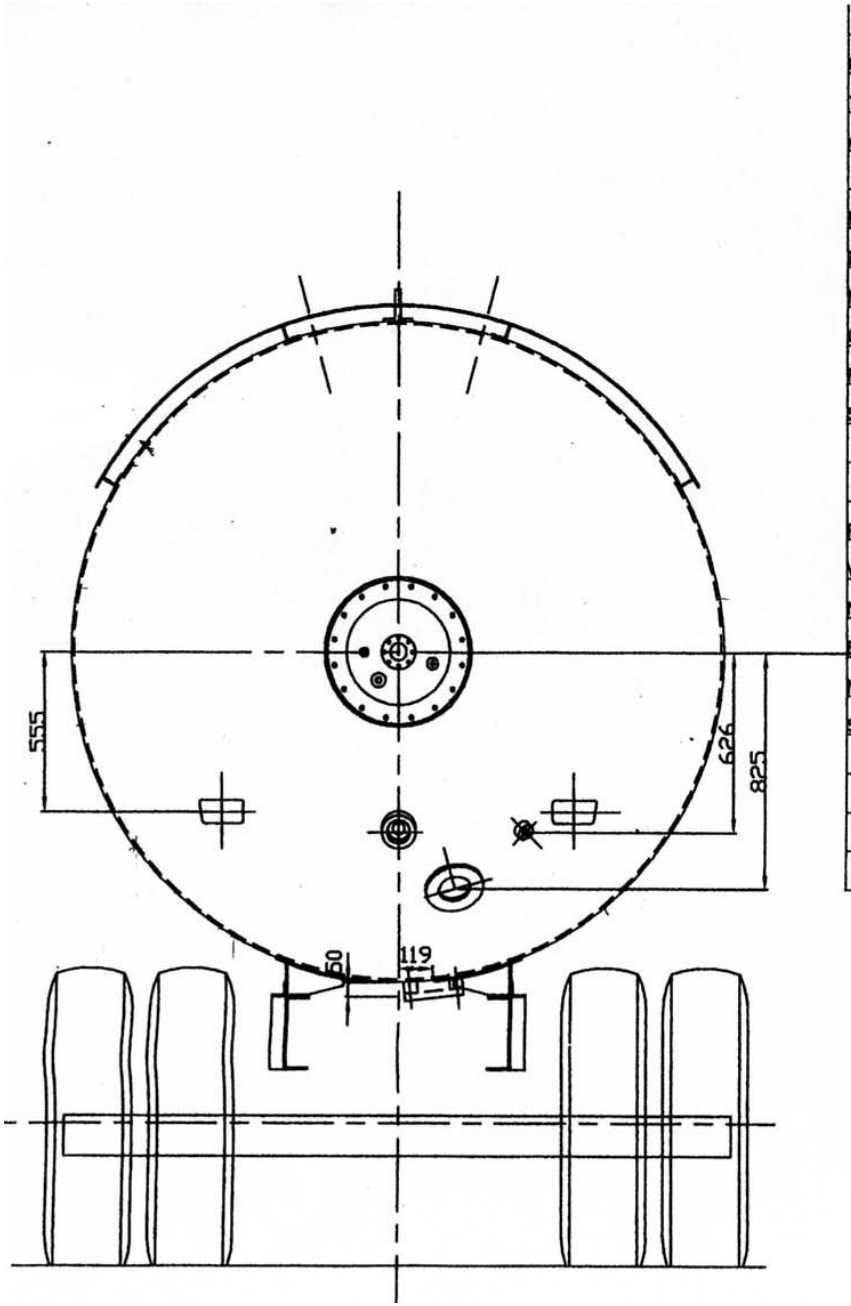


Figure 2 : Plan de masse du châssis porteur – Vue de dessus.



CARACTERISTIQUES		CONDITIONS D'ETUDE	
Capacité totale étude 20200		Régment de construction ADR	
Taux de chargement du propane		A.M. du ??????? to B1a, B1d,	
ADR: 0.42 kg/l		Clr ??????, NF M88100 à 107	
		Pression Maximale de Service	19 b
Masse à vide citerne	kg	Pression de calcul	25 b
D.M. 22m3/h + coffre	kg	Pression d'épreuve	25 b
Masse à vide châssis	kg		
Charge utile	kg	Coeff soudure: 1 Radio 100% + MG	
PTC	kg		
Selon pl. RVI 5010342308		Contrainte max. de calcul:	
		10.75Re; 0.5Rm]=315 N/mm2	
		Cit. Catégorie 3 pour classe 2	
Fonds elliptiques NF E81-103			
Viroles: Acier P460NG1 suivt		Temp. de service -20°C +50°C	
NF XP A36-215 +Add. n° (6/95)			
Bossages soudés: A48FP		Visite avant épreuve CEP	
NF A 36-205		Epreuve du proto sous contrôle DRIRE	
Soudage selon plan 882/96		Proto n° CCG9723	
		MDRT 97 ??? 26V	

Figure 3 : Plan de masse citerne + porteur. Vue arrière.

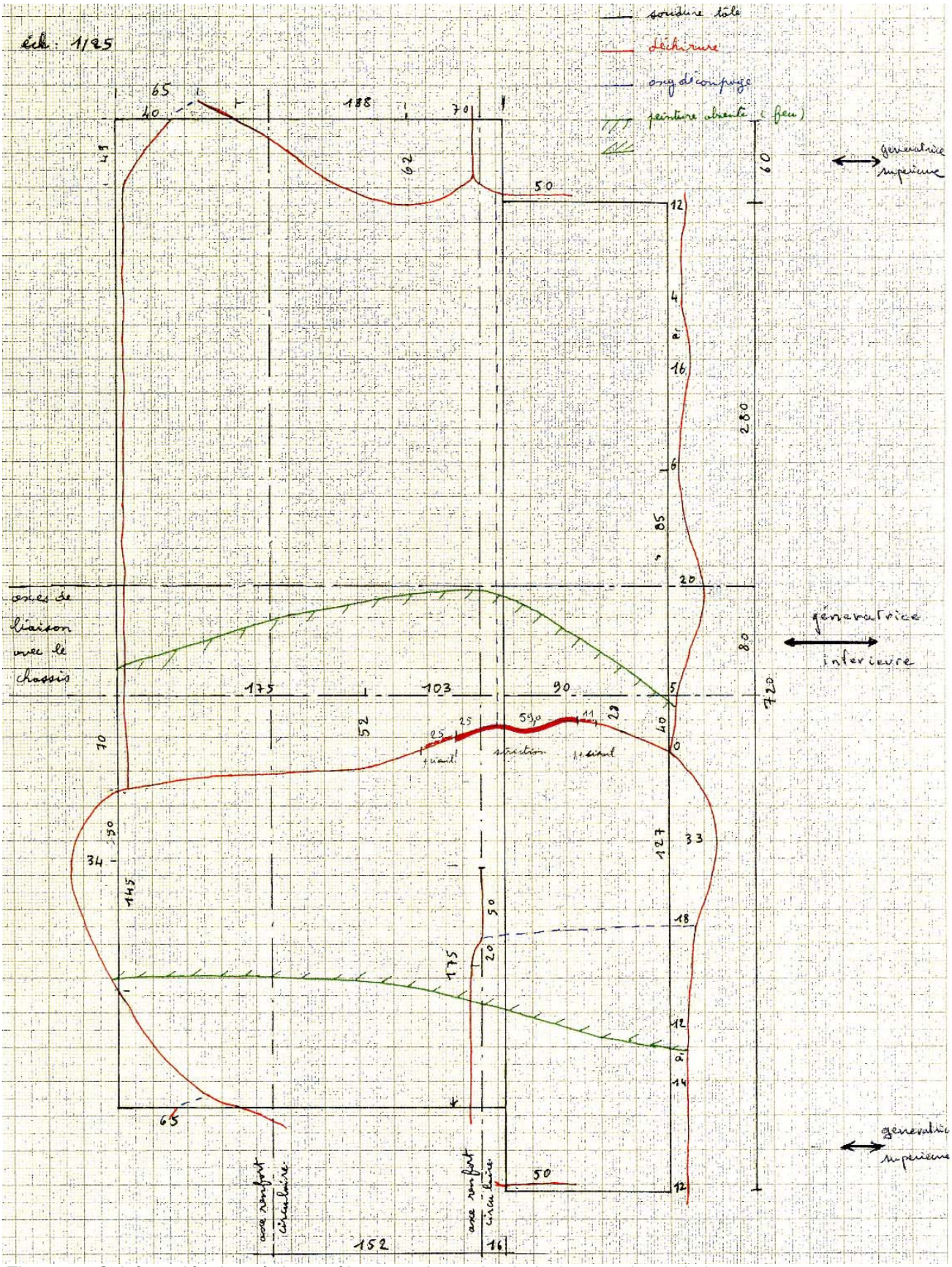


Figure 4 : Schéma développé des 2 tôles constituant la virole (rectangles noirs).
Position des ruptures en traits rouge (la zone ductile est en trait rouge épais)
Position des coupes au chalumeau en traits interrompus courts bleu
Position des supports de brise-flots et des supports de la citerne en traits mixtes noir.

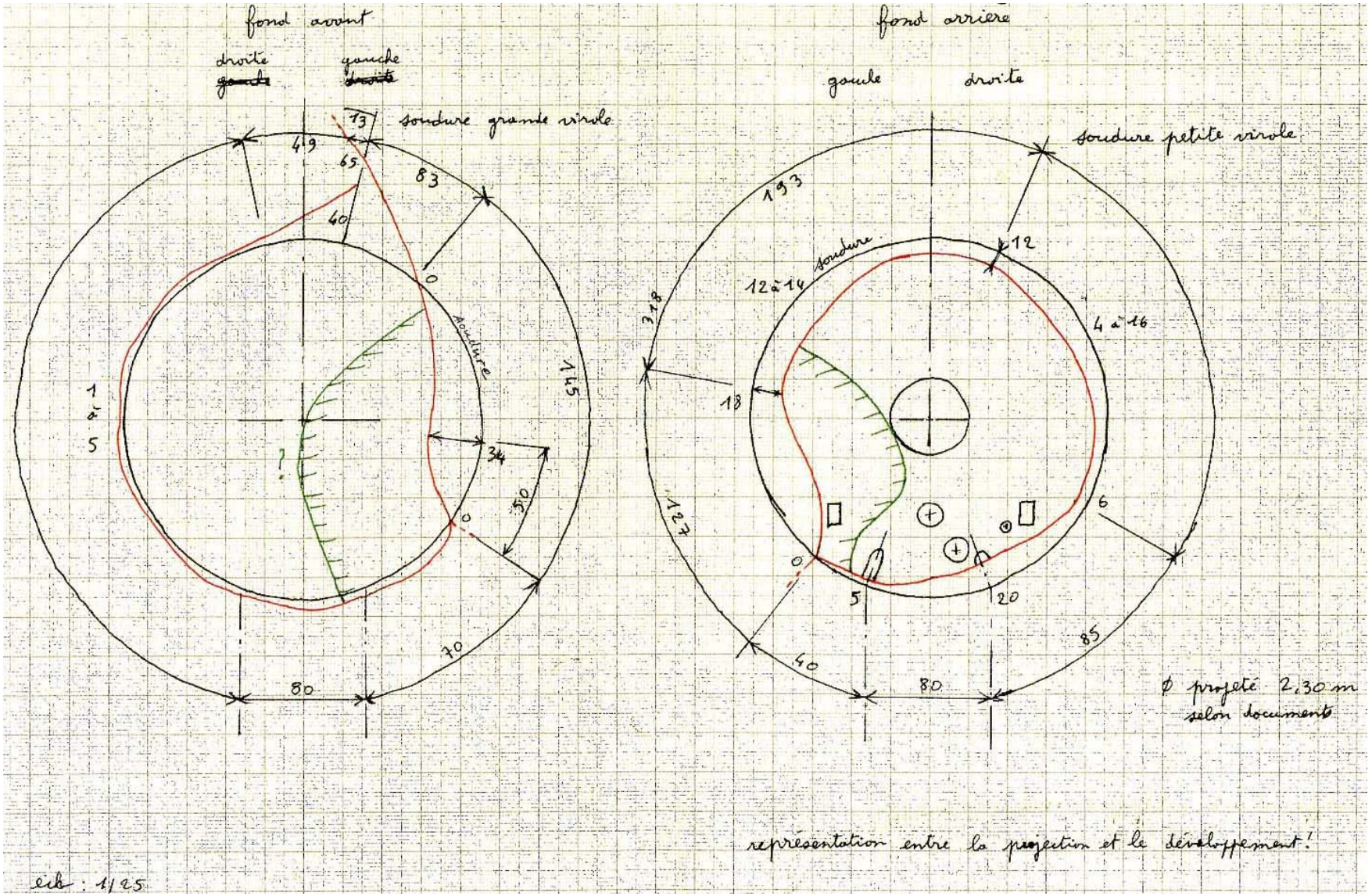


Figure 5 : Schéma des fonds montrant les positions relatives du cordon de soudure fond / virole des ruptures entre fonds et virole (lignes rouges) et les surfaces de peintures détruites par la chaleur (en vert).

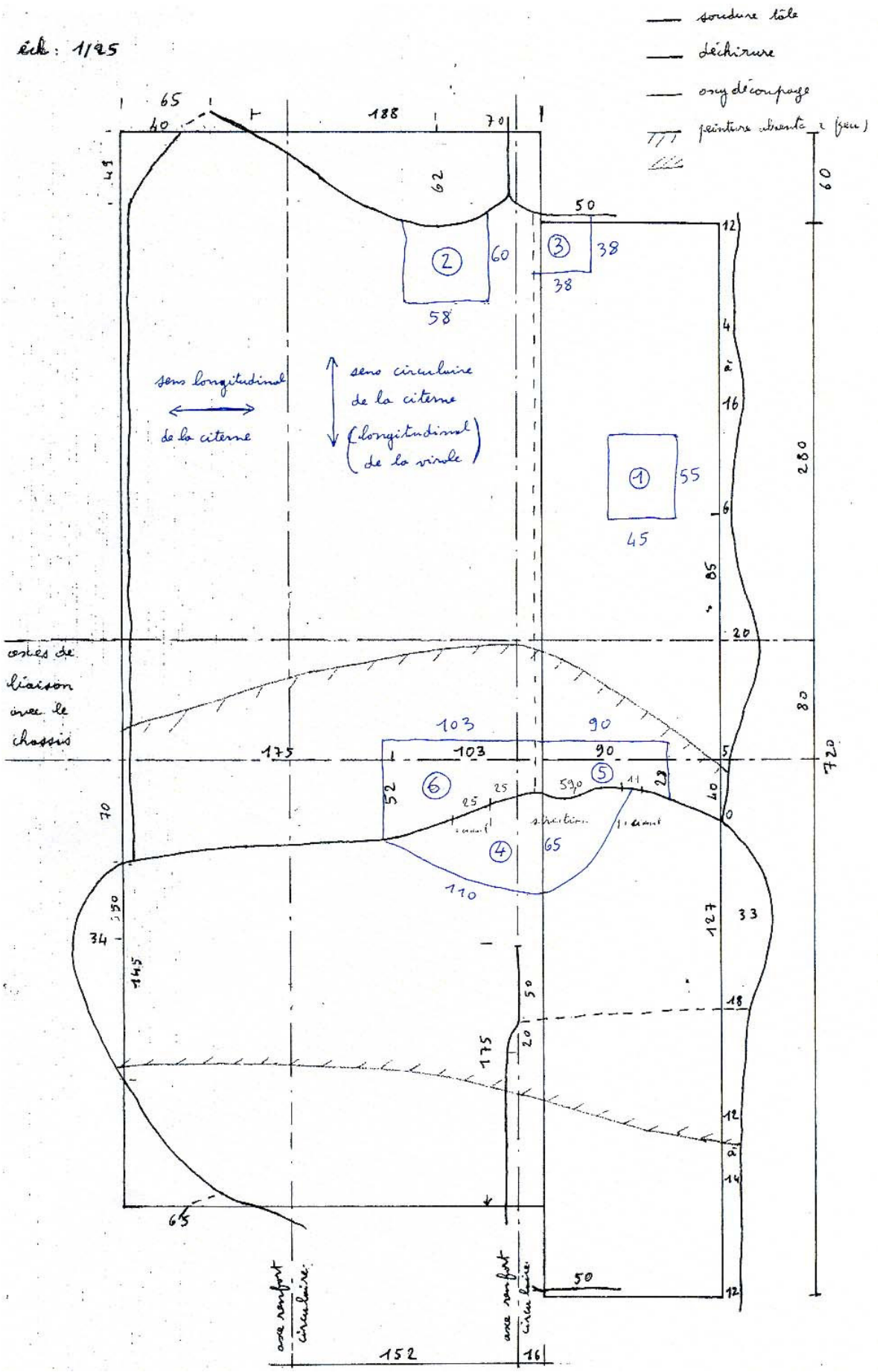


Figure 6 : Position des prélèvements. Le schéma de la figure 4 a été repris. Les prélèvements (en bleu) ont été repérés de 1 à 6 – 1, 2 et 3 en dehors des zones chauffées – 4, 5 et 6 dans la zone d'amorçage ductile de la rupture de la citerne.

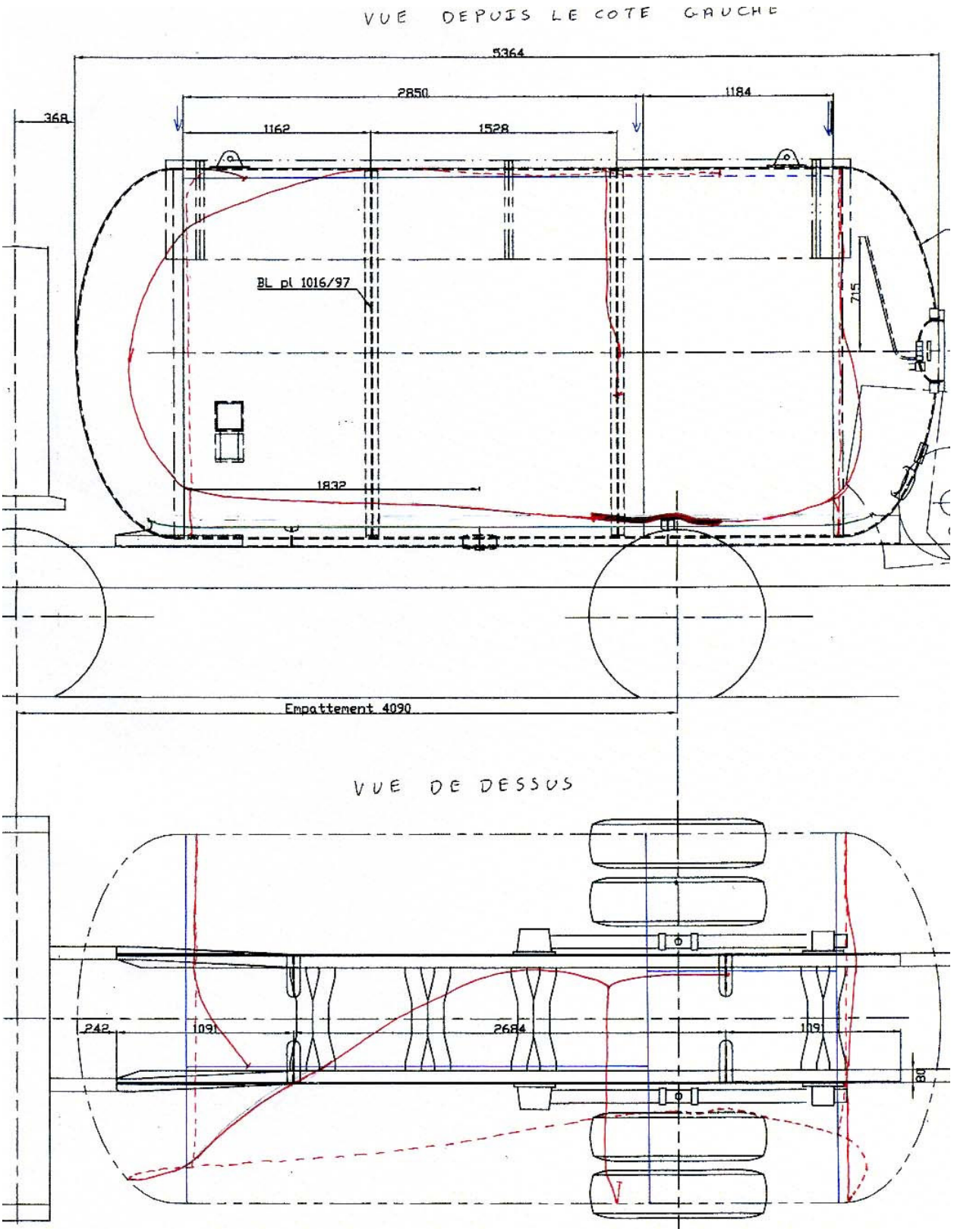


Figure 7 : Position des ruptures sur le plan masse de la citerne (en rouge épais : zone de début de rupture).

Figure 8 : Vue du châssis (côté gauche). Enfoncement au droit du moteur (cabine).

Figure 9 : Châssis côté gauche en avant de l'essieu arrière. Poutre gauche déversée. Poutre droite « arrachée » vers le haut.

Figure 10 : Châssis côté gauche niveau essieu arrière. Jante extérieure écrasée – Jante intérieure « intacte ».

Figure 11 : Châssis arrière et côté gauche : peu de déformation au-delà de l'essieu arrière.

CERTIFICAT DE RECEPTION 3-1-B SELON EN10204/ISO10474
INSPECTION CERTIFICATE 3-1-B TO EN10204/ISO10474

A02

8610086571 Page : 001/FIN
A09/A03

GTS INDUSTRIES
Tolerie Forte T.F.K
Boite postale 6-317
59379 Dunkerque cedex 1
Télex : Usiupdk 132281 F
Tél : 03 28 29 30 00

01: E0,2 >= 460 N/MM2 630 =< RM =< 725 N/MM2 A5,65 >=16% CAL05=RM*A5,65>10000 CAL04=E0,2/RM=<0,86 (5)
02: KV T -20,0 C >= 27 J (MOY) KV >= 19 J (IND)
PLIAGE 4A

B03

CDC:Conforme au cahier des charges / According specifications (1)
BL:Brut de laminage / As rolled
LN:Laminage normalisant / Normalising forming
A :Revenu / Tempered
TE:Trempé à l'eau / Water quenching
LTC:Laminage à température contrôlée / Thermo controled forming
TM:Laminage thermo-mecanique / Thermo-mechanical forming
N:Normalise / Normalised
D:Detentionne / Stress relieved
G:Adouci par recuit / Soft annealed

Sigle du producteur / Trade mark
TFK
A01

Client et/ou destinataire / Purchaser and/or consignee
EIS GUINOR
26 - ETOILE SUR RHONE
A06

N° commande Courtier/client / Broker Purchaser's order N°
8279 GUINOR-GUINOR
OFFR701JP009
A07

N° Commande Usine / Work order N°
605913
A08

Nuances et spécifications techniques / Quality and specifications
P460NG1 XP-A36215/95+ADDENDUM N°2-06/96
B01

Virole

PLAQUES/PLATES ORIGINE BRAME SOLLAC DK
B02

Etat de livraison / Delivery condition (1)
N860°C/1'45/MM
B04

Traitement de référence / Test condition (1)
N860°C/1'45/MM
B05

Organisme et/ou service de contrôle / Inspection
USINE

Identification du produit / Product identification		Poste / Item	Nombre de pièces / Quantity of pieces	Dimensions			Masse unitaire théorique / Theorical piece weight	Emplacement (2)	Traction / Tensile test										Emplacement (2)	Résilience / Notch thoughtness							
Repère pièce / Plate number	Coulée Brame / Heat-Slab			Epaisseur / Thickness	Largeur / Width	Longueur / Length			S (3)	Pos. Z(4)	Type / Form	Réf (5)	Temp °C	E0,2	RM	A5,65	CAL05 < C14 C20	CAL04	C80-C69 >		Réf (5)	Type / Form	S (3)	Temp. °C	Pos. Z(4)	Valeurs individuelles / Individual values < C12 >			Moyenne / Average
B08	B07	B09	B10	B11	B12	B13	B14	C01	C02	C62	C10		C03	C11	C12	C13				C01	C10	C02	C08	C62				C13
750101	092671 221	01	3	9,10	2850	7500	1556	1	T	P	IPRIS	01		496	680	16	11088	0,73		1	02	KV	T	-20,0	PPP	26	32	28	29
750103	092671 222	01	3	9,10	2850	7500	1556	1	T	P	IPRIS	01		506	661	24	15724	0,77		1	02	KV	T	-20,0	PPP	56	54	60	57
750105	092671 223	01	3	9,10	2850	7500	1556	1	T	P	IPRIS	01		499	666	26	17149	0,75		1	02	KV	T	-20,0	PPP	52	46	54	51
750104	092671 224	01	3	9,10	2850	7500	1556	1	T	P	IPRIS	01		501	662	28	18463	0,77		1	02	KV	T	-20,0	PPP	62	58	62	61
750102	092671 231	01	3	9,10	2850	7500	1556	1	T	P	IPRIS	01		501	656	25	16437	0,76		1	02	KV	T	-20,0	PPP	58	50	60	56
Cumul pour la coulée			15				23,3																					
Cumul général			15				23,3																					
CUMUL POUR L'AVIS			15				23,3																					

V2
V1

AC C =< 0,20 MN =< 1,70 P =< 0,020 S =< 0,010 SI =< 0,50 0,010 =< AL =< 0,050 NI =< 0,20 CR =< 0,10 CU =< 0,10 MO =< 0,10 SN =< 0,020 NB =< 0,05
0,02 =< V =< 0,15

Meth. steel making (5)	Repère pièce / Plate number	N° de coulée / Heat number	Analyse sur produit / Check analysis C%	Mn%	P%	S%	Si%	Al%	N i%	Cr%	Cu%	Mo%	Sn%	Nb%	V %	C84	C85	C86	C87	C88	C89	C90	C91	C92	C95
C70/93 CC O/Y	B08	B07 092671	C71 0,18	C72 1,62	C73 0,013	C74 0,003	C75 0,41	C76 0,031	C77 0,02	C78 0,02	C79 0,01	C80 0,00	C81 0,003	C82 0,03	C83 0,13										

ULTRA SONS:CONFORMES A LA NF-A01305/83 CLASSE B QUADRILLAGE 100MM + RIVES 1,5EP MINI 50MM

Commande réalisée conformément à notre manuel ASSURANCE QUALITE / Order manufactured in accordance with our QUALITY ASSURANCE manual

(2) Emplacement / Location
T Tête/Top
P Pied/Bottom

(3) Orientation / Direction
L: Long/Longitudinal
T: Travers/Traverse

(4) Position
C: Coeur/Core sample
F: Peau/Rolled surface
D: 1/3 Epais./Thickness
Q: 1/4 Epais./Thickness

(6) Meth.steel making
T: Thomas M: Martin
E: Electrique/Electric
CC: Coulée continue/ Continuous casting
O/Y: Oxygène pur/

Nous certifions que la fourniture ci-dès a été fabriquée conformément aux spécifications techniques du contrat et que toutes opérations de contrôle et essais effectués, elle répond sous tous ses aspects aux spécifications particulières ainsi qu'aux normes en vigueur s'y rapportant.
We certify hereby that the above mentioned products are consistent with the order prescriptions

Contrôle de marquage, d'aspect et de dimensions : satisfaisants. Les essais de pliage sont satisfaisants
Marking,inspection and measurement : without objection. Bend test results are satisfactory
D01

Date
01/01/97
Agent/Name

L'agent de réception
HOUSSIN
Name of

ANNEXES PHOTOGRAPHIQUES

2ème Partie

(4 pages)

Prélèvements et figure 12
Description d'un citernier semblable
au citernier accidenté.

A.1 – Prélèvements

Les six figures suivantes montrent les prélèvements (des coupons) d'acier extraits de la virole de la citerne. La virole était constituée de deux tôles de largeurs différentes repérées PV et GV (petite et grande tôle de la virole) sur les photographies qui suivent :

Figure A1 : Prélèvement 1.

Figure A2 : Prélèvement 2.

Figure A3 : Prélèvement 3.

Figure A4 : Prélèvement 4.

Figure A5 : Prélèvement 5.

Figure A6 : Prélèvement 6.

A.2 – Aspects de la citerne

Les clichés suivants montrent la présence de peintures sur les éléments de la citerne au moment de l'explosion et l'identification de l'une des 2 tôles de la virole.

Figure A7 : Marquage de l'une des tôles.

Figure A8 : Dessous d'un élément de virole. Peinture noire entre les supports de citerne. Peinture blanche sur le côté droit de la citerne.

Figure A9 : Fond arrière. Peinture blanche et zone chauffée (couleur rouille). Peinture noire entre les supports de citerne.

Figure A10 : Fond avant, côté droit.

Figure A11 : Fissuration de la soudure circonférentielle de la virole sous l'effet d'un allongement plastique.

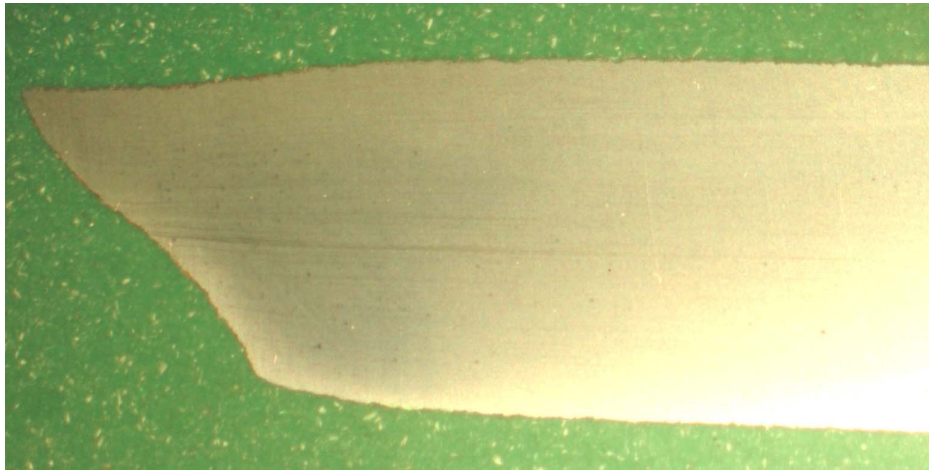


Figure 12 : Coupe transversale au niveau d'une « déchirure » précédée d'un allongement ductile local.

A.3 – Citernier porteur Renault / citerne Guhur

Ci-après sont portées quelques vues d'un citernier semblable à celui impliqué dans l'accident de Nivillac.

Sur le flanc gauche, on note la présence du réservoir de gasoil, qui a probablement été éventré lors du choc final, et la présence d'éléments en matières plastiques (garde boue / carénages).

On note également la présence d'une plaque en bois entre châssis et support de la citerne.

Tous ces éléments sont susceptibles de brûler.

Sur le côté droit, on note la présence du système de pompe et tuyauterie de vidange qui, lors de l'explosion, a pu également « éclater » et déformer le châssis côté droit.

On note qu'au niveau de la soudure circonférentielle, outre les éléments du tracteur, ce sont le garde-boue et les pneumatiques qui pouvaient apporter les calories ayant conduit à l'échauffement de la zone de rupture primaire.

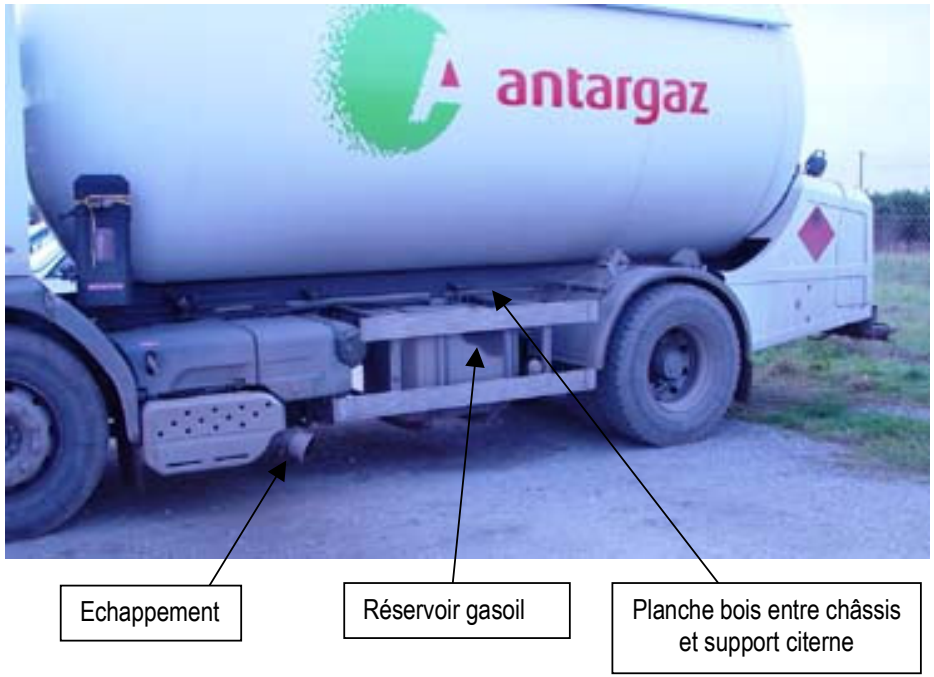


Figure A12 : Flan gauche du citernier. Tous les carters sont en matières plastiques.

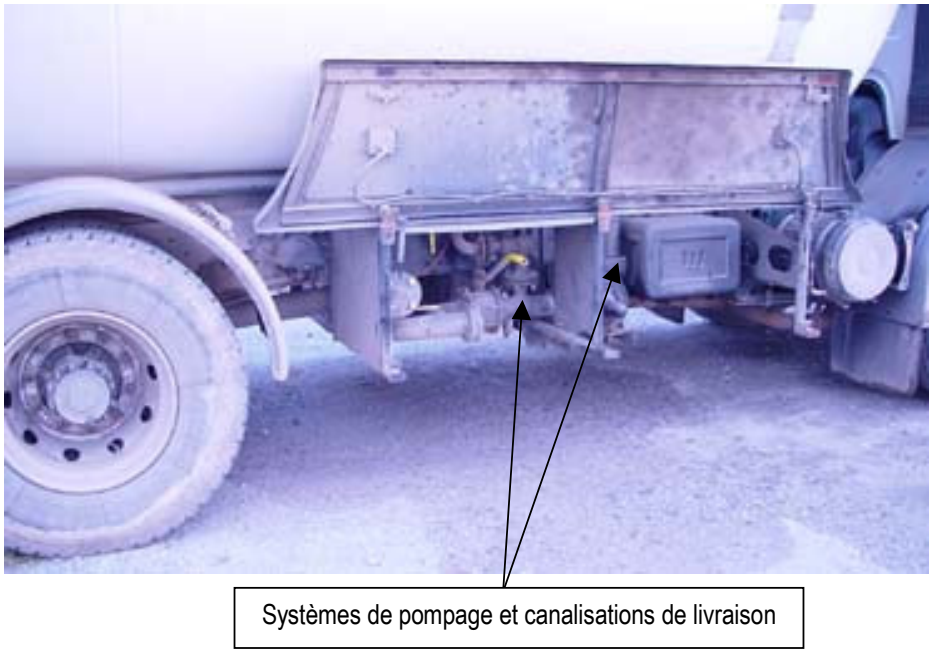


Figure A13 : Flan droit du citernier. Système pompe / tuyauterie rempli de gaz « liquide ».

Annexe 5 : Rapport d'étude de l'Ecole des Mines de Douai/Armines

Centre Commun Armines – Ecole des Mines de Douai
941 rue Charles Bourseul, BP 838, 59508 Douai Cedex

Département
"Mécanique et Comportement des Matériaux"

Etude du mécanisme de rupture d'une citerne de GPL ayant provoqué un BLEVE suite à un accident de la route.

Laboratoire de métallurgie – Affaire suivie par Anne MOUFTIEZ
Tél. 03 27 71 23 16 – Fax 03 27 71 29 18 – Mail : mouftiez@ensm-douai.fr

ARMINES, 60 Bd St Michel, 75272 Paris Cedex 06
Tél : 01 40 51 90 50 – Fax :01 40 51 00 94
Siret 775 664 113 00013-APE 731 Z- TVA Intracommunautaire FR 84 775 664 113

Sommaire

1. Rappel des circonstances de l'accident p.1
2. Examen de la citerne sur son lieu de dépôt p.1
2.1. Localisation de la zone d'impact p.2
2.2. Observation des ruptures p.2
2.3. Estimation de la déformée de la citerne avant explosion p.4
2.4. Hypothèses concernant la chronologie de la rupture p.4
3. Prélèvements p.5
4. Caractérisation des parties "saines" p.5
4.1. Analyse chimique p.6
4.2. Caractéristiques mécaniques p.6
4.3. Examens métallographiques et dureté p.7
4.4. Examen du joint soudé circulaire p.8
4.5. Conclusions p.9
5. Examen métallographique des parties chauffées p.10
5.1. Examen des viroles p.10
5.2. Examen du joint soudé circulaire p.11
5.3. Elaboration des défauts du joint soudé circulaire p.13
5.4. Conclusions p.14
6. Examen des ruptures p.14
6.1. Observation de la rupture du cordon de soudure p.14
6.2. Mécanisme de rupture du cordon de soudure p.17
6.3. Evaluation des contraintes au cours de l'incendie p.17
6.4. Examen de la rupture "en striction" p.19
6.5. Examen de la rupture "en cisaillement" p.20
6.6. Conclusions p.21
Conclusion générale p.22

A la demande du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), sur requête du bureau d'études accidents terrestres (BEATT), nous avons examiné une citerne de GPL ayant rompu suite à un accident de la route. La présente étude a pour objectif de déterminer l'influence des diverses sollicitations auxquelles la citerne a été soumise dans les circonstances de l'accident, et par quel mécanisme elle a finalement rompu.

1. Rappel des circonstances de l'accident :

Le 18 novembre 2003, sur une route à deux fois deux voies, un ensemble routier a traversé les rails de sécurité et percuté au ¾ avant gauche le camion citerne qui circulait en sens inverse. Suite à la collision un incendie a eu lieu, qui a conduit à l'explosion de la citerne. Les rapports de gendarmerie font état des circonstances suivantes :

Horaire	Evènement	Position des véhicules
	Ensemble routier frôle grillage voie express sur sa droite, à cheval entre B.A.U. et fossé.	
Entre 16h40 et 16h50	Ensemble routier traverse glissières centrales de sécurité	Déséquilibre de l'ensemble routier, prêt à verser sur sa droite. Trajectoire à 45° par rapport à l'axe de la route.
Entre 16h40 et 16h50	Ensemble routier percute citernier.	Véhicules sur BAU, citernier sur ses essieux, ensemble routier couché sur côté droit. Selon les témoignages originaux, le tracteur ne se serait pas couché.
Entre 16h40 et 16h50	Les deux poids lourds prennent feu.	
choc + 10 minutes	Embrasement complet	
16h55 – 17h10	Incendie : petites explosions.	
17h10	Sifflement puis explosion	

Au moment de l'accident, le citernier contenait environ 3150 litres de propane. Sous l'effet de l'explosion, le fond arrière de la citerne a été complètement désolidarisé du reste.

2. Examen de la citerne sur son lieu de dépôt.

Pour des raisons de transport et de stockage, la citerne a été découpée en plusieurs morceaux. Initialement, d'après les plans du constructeur, les fonds avant et arrière étaient soudés à une virole de diamètre 230 cm et de longueur 403,4 cm, la virole étant elle-même constituée par l'assemblage d'une "grande" virole de longueur 285 cm (vers l'avant) et d'une "petite" virole de longueur 118,4 cm (vers l'arrière). Sur le lieu de dépôt, on trouve 5 morceaux, dont un plan développé a été établi par le laboratoire des ponts et chaussées à l'échelle 1/25 :

- le fond arrière, qui s'est détaché sur 100% de sa circonférence lors de l'explosion.
- le fond avant, qui s'est détaché sur 80% de sa circonférence lors de l'explosion, le reste ayant été découpé au chalumeau.

- un morceau de la grande virole, qui représente à peu près 60% de la circonférence, et qui a été désolidarisé de la petite virole par découpe au chalumeau le long du joint soudé.
- un morceau de la petite virole, qui représente 75% de la circonférence.
- un morceau constitué d'un morceau de grande virole soudé à un morceau de petite virole, et comportant également des morceaux des deux fonds. La formation de ce morceau résulte de la déchirure dans le sens longitudinal de la virole qui s'est produite lors de l'explosion, vers le bas du côté gauche de la citerne.

2.1. Localisation de la zone d'impact :

Le morceau comportant des parties de tous les éléments constitutifs de la citerne présente un enfoncement vers ce qui était l'intérieur de la citerne. La géométrie angulaire de cet enfoncement suggère qu'il s'agit du point d'impact avec le camion frigorifique (cliché 1 et 2). Ce point d'impact se situe à mi-hauteur de la citerne, presque au milieu de la virole (aux 2/3 de la grande virole), ce qui correspond aux ¾ de l'empattement du camion citerne.

Cliché 1 : enfoncement angulaire vers l'intérieur de la citerne

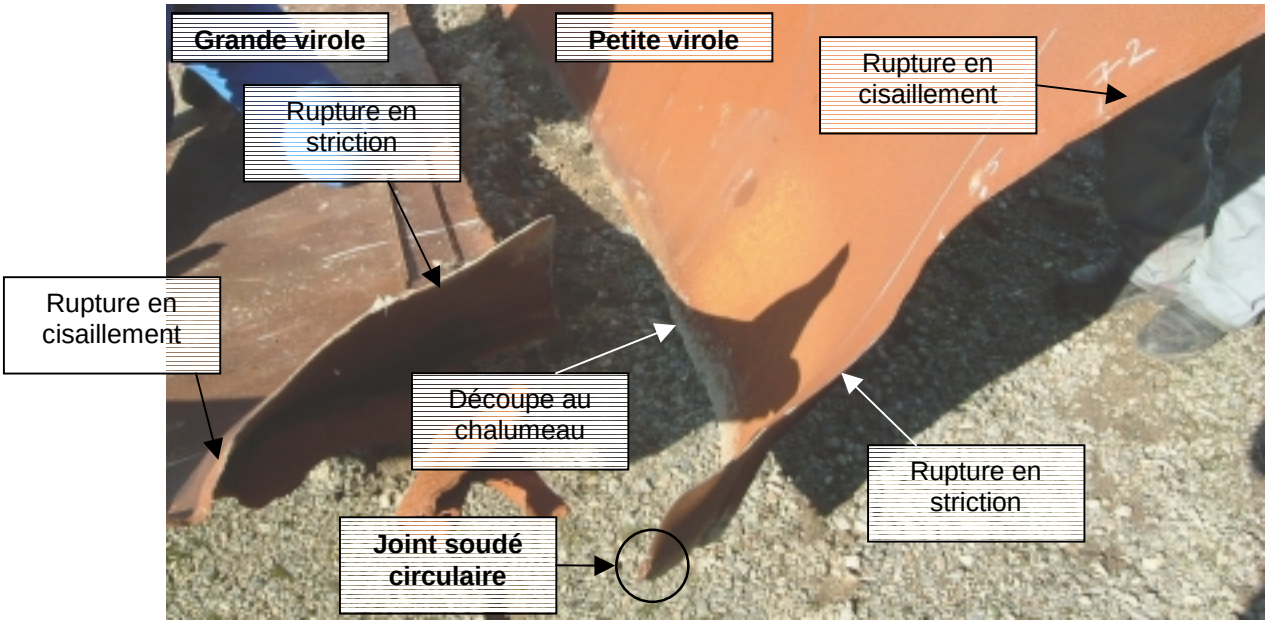
Cliché 2 : position de l'impact

L'intégrité du matériau a été conservée au point d'impact. On n'y observe pas de fissures, et on constate que la virole s'est déchirée autour de ce point. Il ne semble donc pas y avoir de rapport direct entre la collision et la rupture, hormis la contribution des contraintes résultant de la déformation en ce point sur l'ensemble de la virole.

2.2. Observation des ruptures :

Les lèvres de rupture des fonds résultent de cisaillement à 45°. Elles ont eu majoritairement lieu le long du joint soudé entre les fonds et les viroles. Dans le cas du fond avant, le joint est resté sur le fond, tandis que pour le fond arrière, le joint est resté sur la petite virole.

Toutes les déchirures observées sur la citerne présentent les mêmes caractéristiques de cisaillement, sauf la rupture longitudinale principale, sur environ 50 cm de chaque côté du joint soudé circulaire qui relie les deux morceaux de virole. De toutes les déchirures observées sur la citerne, cette zone est la seule qui présente de la striction. Une découpe au chalumeau a été pratiquée au milieu de cette zone, le long du joint soudé circulaire, afin de dissocier la grande et la petite virole lors du transport (cliché 3).



Cliché 3 : zone de rupture en striction sur les morceaux de virole.

Le vis-à-vis de cette rupture en striction a en revanche été conservé dans son intégralité sur le morceau comprenant des parties de tous les éléments constitutifs de la citerne. On constate que les tôles et le joint soudé circulaire se sont enroulés vers ce qui était l'intérieur de la citerne à l'endroit de la striction (cliché 4). On remarque que le joint soudé s'est fissuré à de nombreux endroits (cliché 5), probablement sous l'effet de la forte déformation qu'il a subie ; toutefois, ces fissures ne se sont pas propagées dans les tôles. Les autres joints soudés ne présentent pas de telles fissures.

Cliché 4 : zone de rupture en striction.

Cliché 5 : fissures dans le joint soudé circulaire.

La zone de rupture en striction se trouve en position basse sur le flanc de la citerne, du côté du point d'impact. On peut supposer que la plus forte déformation des tôles dans cette zone s'explique par leur proximité avec la source de chaleur au cours de l'incendie.

2.3. Estimation de la déformée de la citerne avant explosion :

Un relevé des longueurs des soudures circulaires, utilisées comme jauges d'extensométrie, a été effectué dans le but d'estimer la déformée de la citerne juste avant la rupture.

Le joint soudé entre le fond avant et la virole se répartit comme suit :

589 cm sur le fond avant ; 146 cm sur la partie enfoncée ; total : 735 cm

Le joint soudé entre les deux morceaux de virole se répartit comme suit :

565 cm sur la petite virole ; 170 cm sur la partie enfoncée ; total : 735 cm

Le joint soudé entre la virole et le fond arrière se répartit comme suit :

594 cm sur la petite virole ; 127 cm sur la partie enfoncée ; total : 721 cm

La longueur de ces joints soudés prévue par les plans est de 722 cm.

Aux erreurs de mesure près, on constate que le joint soudé entre la virole et le fond arrière n'a pas subi de déformation par rapport à sa dimension initiale.

Le joint soudé entre les deux parties de virole s'est allongé d'environ 2%, ce qui corrobore l'observation qu'il traverse une zone de striction, et qu'il présente de nombreuses fissures.

Le joint soudé entre le fond avant et la virole s'est également allongé d'environ 2%. Toutefois, on n'observe pas de déformation importante du matériau à proximité de ce joint soudé. Le fait que le joint du fond arrière ne se soit pas déformé, alors qu'il est plus proche du point chaud que le joint avant, élimine l'hypothèse d'un gonflement généralisé de la citerne sous l'effet de l'augmentation de pression interne due à l'incendie. Il est probable que la déformation du joint avant s'est produite après l'explosion, par relaxation des contraintes de cintrage du fond avant, sur lequel il est majoritairement situé.

2.4. Hypothèses concernant la chronologie de la rupture :

A l'issue des observations effectuées sur l'ensemble de la citerne, il ressort que :

- l'impact avec l'ensemble routier n'a pas créé d'endommagement en lien direct avec la rupture.
- l'incendie n'a pas provoqué une augmentation de pression suffisante pour conduire à un gonflement généralisé de la citerne : l'enfoncement au point d'impact est demeuré, une déformation localisée en partie basse s'est produite autour et dans le joint circulaire reliant les deux viroles.

Le scénario suivant peut alors être envisagé :

- amorçage de la rupture en partie basse, au niveau du "point" chaud, probablement situé à proximité du réservoir du citernier, s'accompagnant d'un fort sifflement (fuites dues à la pression interne)
- perte de pression conduisant à la vaporisation du liquide surchauffé (explosion)
- rupture du reste de la citerne sous l'effet de la surpression.

Le mécanisme de rupture en partie basse reste à déterminer, notamment pour ce qui concerne la chronologie des ruptures respectives des tôles et du joint soudé. Deux hypothèses peuvent être envisagées :

- perte de caractéristiques mécaniques des tôles consécutive à l'échauffement ; simultanément, augmentation de la pression locale jusqu'à rupture. La longueur de la rupture en striction paraît toutefois peu compatible avec la production d'un sifflement strident provoqué par la fuite initiale qu'elle engendrerait. De plus l'allongement du métal paraît faible (seulement 2%), mais on peut imaginer un bridage par le joint soudé.

- fissuration du joint soudé (plus compatible avec l'émission d'un sifflement), rupture en cisaillement des tôles sous l'effet de la surpression. Dans ce cas, la striction s'expliquerait par l'échauffement local préalable au cisaillement. Cependant, le mécanisme de rupture de la soudure reste à déterminer.

3. Prélèvements

Les prélèvements numérotés de 1 à 5 ont été choisis afin d'effectuer une comparaison entre les caractéristiques des éléments mis en jeu dans la rupture (grande virole, petite virole et joint soudé circulaire) avant et après l'accident. Nous supposons que les morceaux de citerne encore recouverts de peinture peuvent être considérés comme représentatifs de l'état initial. Ils seront désignés comme la "partie saine" de la citerne. A l'opposé, toute la zone rompue en striction sera considérée comme la "partie chauffée".

Dans un premier temps, les éléments de la "partie saine" seront caractérisés en comparaison avec les caractéristiques de la norme afin d'évaluer la conformité des matériaux aux exigences de la réglementation (prélèvements 1 à 3 correspondant respectivement à la petite virole, la grande virole, et le joint soudé circulaire).

Puis l'influence de l'échauffement sur ces éléments sera examinée, par comparaison entre les caractéristiques de la partie chauffée (prélèvements 5 et 6 correspondant respectivement à la petite virole et la grande virole) et de la partie saine.

Enfin, les ruptures seront observées (prélèvement 4 correspondant à la rupture en striction observée sur le morceau comprenant des parties de tous les éléments constitutifs de la citerne, prélèvements 5 et 6 correspondant à l'autre lèvre de la rupture en striction) afin de valider l'une ou l'autre des hypothèses émises ci-dessus.

4. Caractérisation des parties "saines":

Le matériau prévu par les plans du constructeur est un acier P 460 N G1, acier soudable à grain fin, de limite élastique minimale garantie 460 MPa. Cette nuance ne figure pas dans la norme NF A 36-215 de novembre 1997. Le plan du constructeur précise en effet qu'elle relève du projet de norme NF XP A36-215 + add n° 6/95. Il ne nous a pas été possible de nous procurer ce document.

En revanche, nous avons à notre disposition le dossier de réception type, qui comporte les certificats matière suivant la norme XP A36-215 + addendum n°2 (06/96) en termes de composition chimique et de caractéristiques mécaniques. Ces valeurs seront utilisées pour évaluer la conformité de la nuance aux exigences de la norme dont il relève.

A titre indicatif, on affichera également les valeurs données par la NF A 36-215 pour la nuance P 460 N J2, qui est a priori, parmi les nuances figurant dans cette norme, la plus proche de la nuance P 460 N G1.

4.1 Analyse chimique.

Les certificats matière des tôles utilisées dans la construction de la citerne examinée nous ont été fournis. Les numéros de tôle correspondants sont 92671-221 et 92671-223. Ce dernier numéro figure à l'intérieur de ce qu'il reste de grande virole sur le lieu de dépôt de la citerne. Les deux tôles proviennent de la même coulée (n° 92671).

L'analyse chimique des viroles a été effectuée par spectroscopie. Les teneurs massiques en éléments apparaissent dans le tableau 1 ci-dessous, en comparaison avec les données des différentes normes, ainsi que les valeurs données par le certificat matière de la coulée.

	C	Si max	Mn	P max	S max	Al total min	Cr max	Cu max	Mo max	Nb max	Ni max	V	Sn max
P 460 N J2	≤ 0,20	0,50	≤ 1,70	0,020	0,010	0,005	0,15	0,18	0,10	0,05	0,50	0,02-0,15	0,02
P 460 N G1	≤ 0,20	0,50	≤ 1,70	0,020	0,010	0,01–0,05	0,10	0,10	0,10	0,05	0,20	0,02-0,15	0,02
92671	0,18	0,41	1,62	0,013	0,003	0,031	0,02	0,01	0,00	0,03	0,02	0,13	0,003
Petite virole	0,11	0,43	1,60	0,012	0,004	0,03	0,03	<0,02	<0,02	0,03	0,02	0,12	0,001
Grande virole	0,17	0,42	1,60	0,012	0,005	0,03	0,03	<0,02	<0,02	0,03	0,02	0,12	0,001

Tableau 1 : analyse chimique des tôles

Les analyses effectuées ne présentent pas d'anomalie.

4.2 Caractéristiques mécaniques.

Les caractéristiques mécaniques présentées dans le tableau 2 ont été obtenues par essai de traction sur éprouvettes cylindriques proportionnelles, de diamètre 7 mm prélevées dans les tôles dans le sens circulaire de la citerne, qui correspond au sens long des tôles (de dimensions initiales minimales : 9,10 x 2850 x 7500). Elles sont comparées aux valeurs fournies par la norme dont relève la nuance P460NG1, par la norme actuelle pour la nuance P460NJ2, et par les certificats matière des deux tôles, qui précisent que les essais ont été effectués sur éprouvettes de traction prismatiques prélevées en peau dans le sens travers du produit. Afin d'évaluer l'influence du sens de prélèvement, une éprouvette cylindrique a été usinée dans le sens long de la citerne dans la tôle de la petite virole.

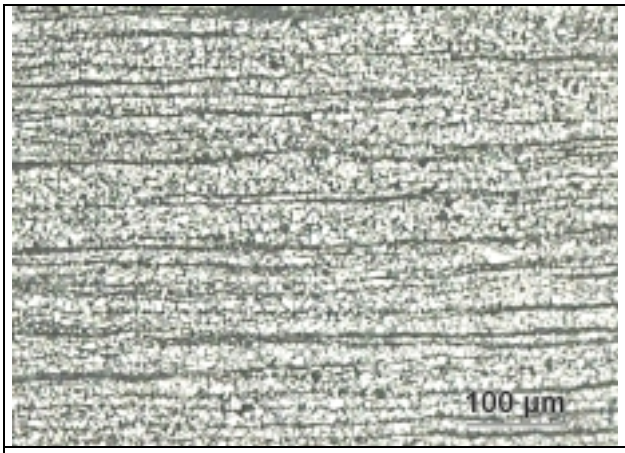
	$R_{p0.2}$ min (MPa)	R_m (MPa)	A% min	$R_{p0.2}/R_m$ max	R_m x A% min
P460NJ2	460	640-725	20	0,85	10 000
P460NG1	460	630-725	16	0,85	10 000
92671-221	496	680	16	0,73	11 088
Petite virole	509	702	22,8	0,73	16 005
Petite virole non circulaire	493	686	27,1	0,72	18 591
92671-223	499	666	26	0,75	17 149
Grande virole	501	704	25,7	0,71	18 093

Tableau 2 : caractéristiques mécaniques des tôles

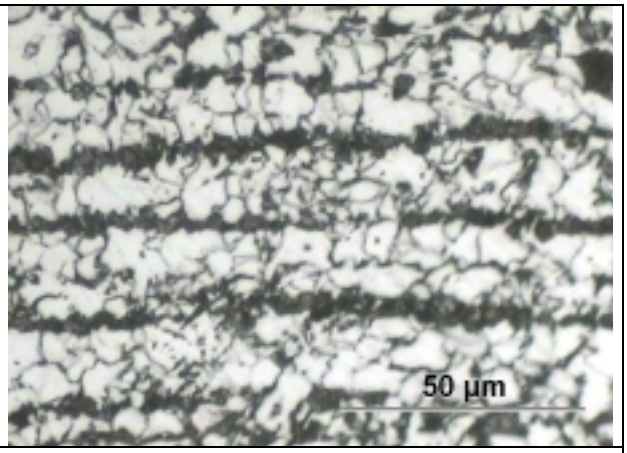
On observe une certaine dispersion en fonction du sens de prélèvement, mais quel qu'il soit, les caractéristiques mécaniques de traction sont conformes.

4.3. Examens métallographiques et dureté

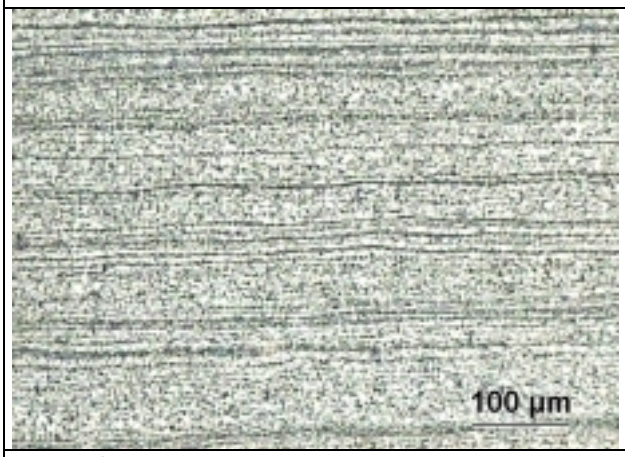
Des prélèvements ont été effectués dans les parties réputées saines des deux viroles, dans les sens circulaire et longitudinal de la citerne. La microstructure a été observée en microscopie optique après attaque au Nital (clichés 6 à 9).



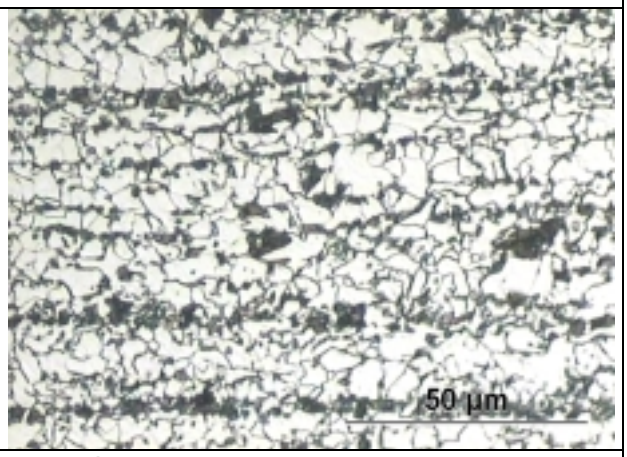
Cliché 6 : Grande virole – sens long de la citerne – attaque Nital x100



Cliché 7 : Grande virole – sens long de la citerne – attaque Nital x500



Cliché 8 : Petite virole – sens circulaire de la citerne – attaque Nital x100



Cliché 9 : Petite virole – sens circulaire de la citerne – attaque Nital x500

La structure observée est une structure ferrito-perlitique en bandes, due à l'élaboration des tôles constitutives de la citerne. Conformément aux exigences de la norme, le grain est très fin (taille inférieure à celle correspondant à l'indice VI d'après la norme NF A 04-102). On n'observe pas de différence nette entre le sens long de la citerne et le sens circulaire, qui correspond à la direction de laminage, puis de cintrage des tôles.

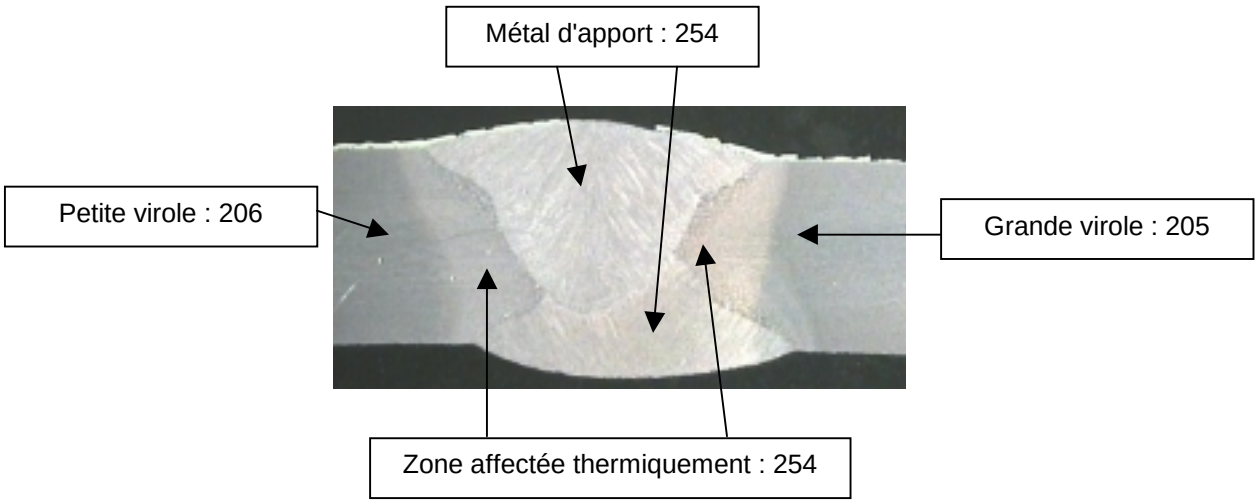
Des mesures de dureté ont été effectuées par indentation Vickers sous une charge de 10 kg. Les résultats apparaissent dans le tableau 3 ci-après, ainsi que les valeurs de résistance mécanique correspondantes évaluées d'après la norme NF A 03-173. La dispersion est du même ordre que celle obtenue lors des essais de traction.

	Valeurs de dureté (Hv10)	Valeur moyenne (Hv10)	R_m (MPa)
Petite virole sens circulaire	206 ; 221 ; 206	211	675
Petite virole sens longitudinal	206 ; 206 ; 193	202	640
Grande virole sens circulaire	236 ; 221 ; 206	221	697
Grande virole sens longitudinal	221 ; 206 ; 221	216	687

Tableau 3 : valeurs de dureté des tôles

4.4. Examen du joint soudé circulaire.

Le joint soudé entre les deux viroles a été également caractérisé en macrographie (cliché 10) et en dureté (les valeurs indiquées résultent d'une moyenne sur 3 empreintes Vickers Hv_{10}).



Cliché 10 : coupe transversale du joint soudé circulaire

La soudure est une soudure en X. Elle a été réalisée en deux passes. Elle ne présente pas de défaut.

Un essai de traction a été effectué sur une éprouvette prélevée transversalement par rapport à la soudure : la rupture a eu lieu dans le métal de base. On vérifie que la résistance du métal d'apport et de la zone affectée thermiquement est supérieure à celle des tôles constituant les viroles.

Des essais de flexion par choc ont été réalisés sur des éprouvettes à entaille en V. L'entaille a été usinée selon le rayon de la circonférence de la citerne, de sorte de bien prendre en compte la

contribution des deux passes. Deux éprouvettes ont été sollicitées à température ambiante, la troisième à 0°C. Dans les trois cas, la valeur du travail de rupture n'indique aucun caractère de fragilité du joint soudé (tableau 4).

Température d'essai	Travail de rupture (J)	Résilience (J/cm²)
20°C – largeur 7,5 mm	101	135
20°C – largeur 7,5 mm	104	139
0°C – largeur 7,3 mm	106	145

Tableau 4 : valeurs de résilience du joint soudé circulaire

4.5. Conclusions.

L'examen des parties réputées saines ne présente pas d'anomalie par rapport aux exigences des normes auxquelles le constructeur fait référence.

L'acier utilisé dans la construction de la citerne est un acier dont la teneur en carbone est peu élevée, ce qui favorise sa soudabilité, et dont les caractéristiques mécaniques sont obtenues par des additions de vanadium et par des conditions de laminage favorisant un grain très fin. La norme précise en outre que ses caractéristiques mécaniques peuvent être obtenues soit à l'issue d'un laminage dit normalisant, soit à l'issue d'un traitement de normalisation.

La mise en forme par cintrage, suivie de la déformation subie lors de l'explosion n'a pas affecté la capacité d'allongement des tôles, qui reste supérieure à 20%.

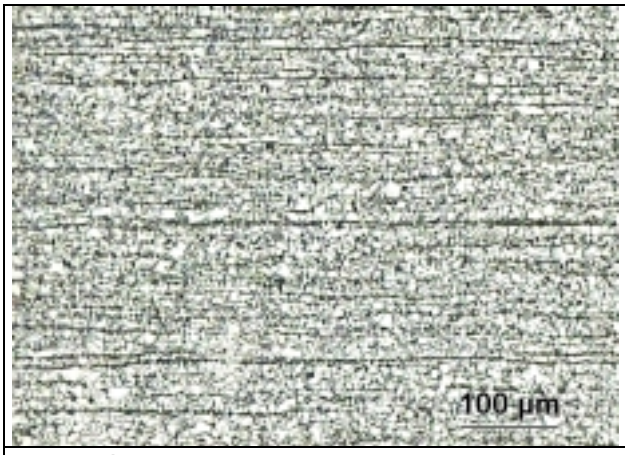
Le joint soudé circulaire, ainsi que la zone affectée thermiquement, possèdent une résistance mécanique supérieure au métal de base. Les essais de flexion par choc pratiqués sur la soudure ne révèlent pas de caractère fragile.

5. Examen métallographique des parties chauffées

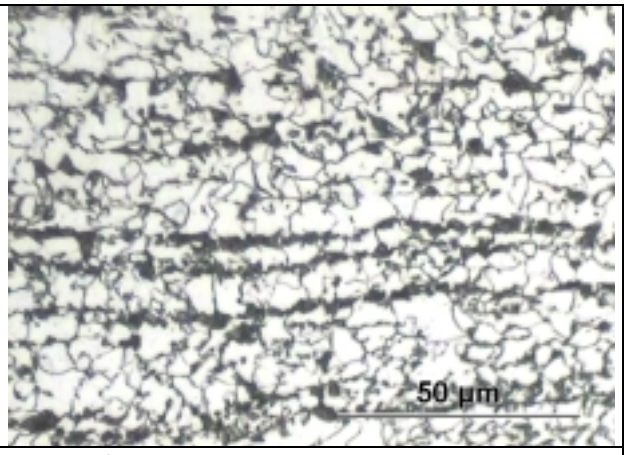
Les parties qui ont été chauffées ont également été le siège de déformations plus importantes. Dans la mesure où les effets thermiques (a priori susceptibles de provoquer une perte de résistance), et les effets mécaniques (a priori susceptibles de provoquer l'effet inverse) s'opposent, leur influence pourra ne pas être mise en évidence.

5.1. Examen des viroles :

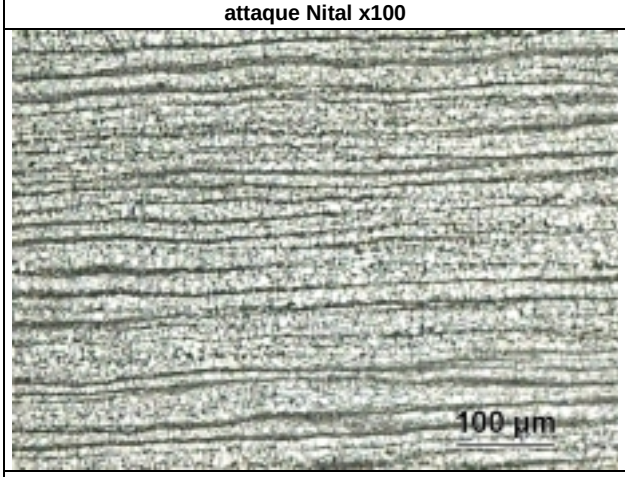
La structure des tôles des deux viroles dans les zones chauffées a été examinée dans le sens longitudinal en microscopie optique après attaque au Nital (clichés 11 à 14).



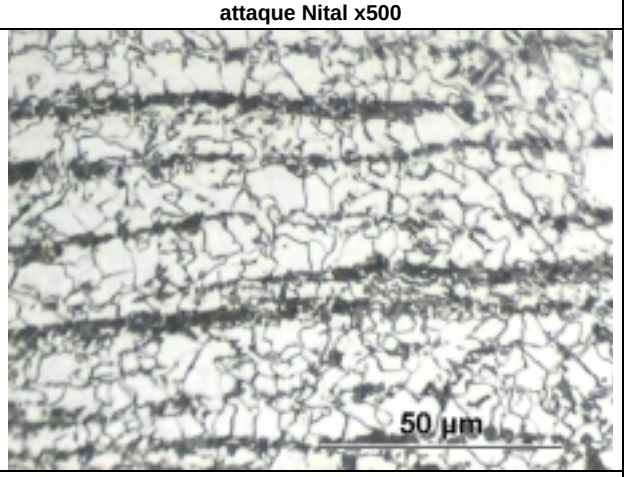
Cliché 11 : Grande virole – sens long de la citerne – attaque Nital x100



Cliché 12 : Grande virole – sens long de la citerne – attaque Nital x500



Cliché 13 : Petite virole – sens long de la citerne – attaque Nital x100



Cliché 14 : Petite virole – sens long de la citerne –attaque Nital x500

On ne constate pas d'évolution par rapport à l'état initial.

Des mesures de dureté ont été effectuées par indentation Vickers sous une charge de 10 kg, afin d'évaluer l'évolution de résistance mécanique due au chauffage. En effet, la courbure des tôles dans la partie chauffée est trop importante pour extraire par usinage des éprouvettes de traction. Les résultats apparaissent dans le tableau 5 ci-après, ainsi que les valeurs de résistance mécanique correspondantes évaluées d'après la norme NF A 03-173.

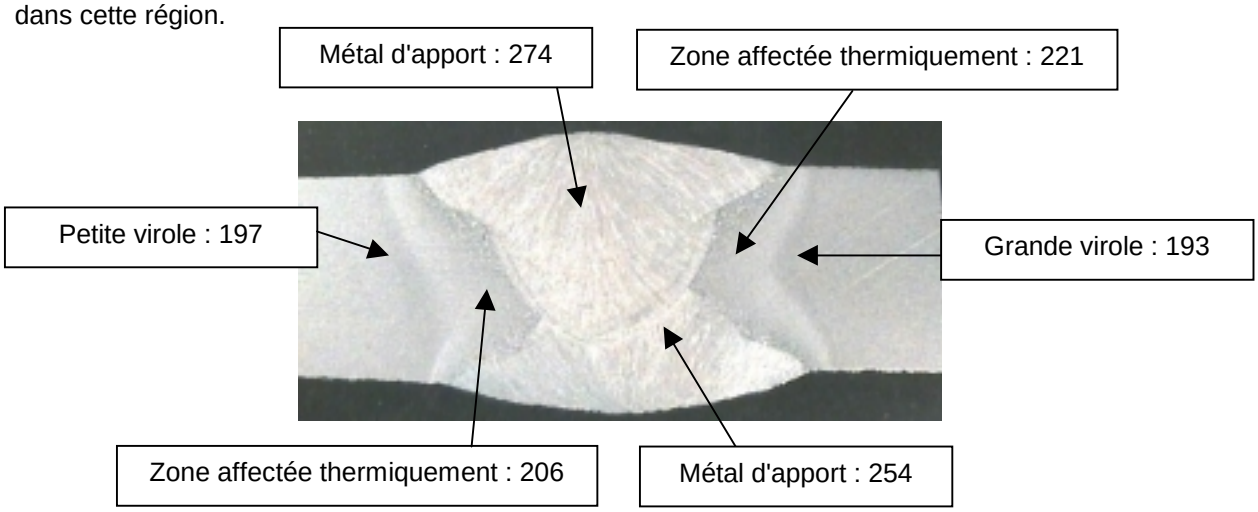
	Valeurs de dureté (Hv10)	Valeur moyenne (Hv10)	R_m (MPa)
Petite virole sens longitudinal	193 ; 193 ; 206	197	623
Grande virole sens longitudinal	193 ; 193 ; 193	193	612

Tableau 5 : valeurs de dureté des viroles chauffées

On constate une perte de caractéristiques mécaniques suite à l'échauffement, qui deviennent inférieures aux valeurs minimales spécifiées dans la norme. Toutefois, cette perte reste limitée. En effet, la dureté d'un acier à 0,15% de carbone qui n'aurait pas subi d'augmentation de caractéristiques mécaniques par affinement du grain ou addition d'éléments carburigènes, se situe aux alentours de 155 Hv, soit 500 MPa.

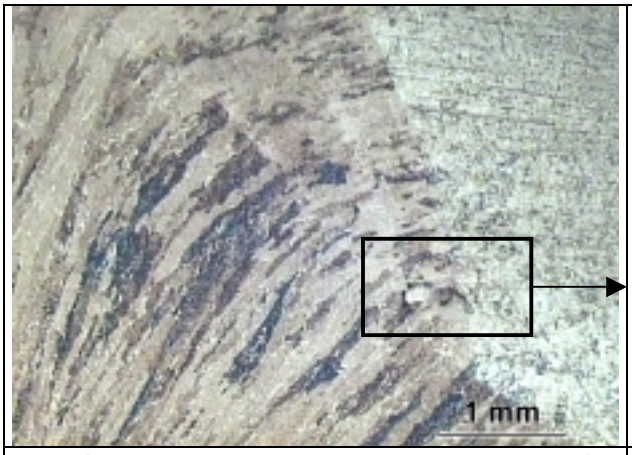
5.2. Examen du joint soudé circulaire dans la partie chauffée:

Un prélèvement dans la soudure dans la partie chauffée, sous la rupture, a été effectué. La macrographie ne révèle pas de défauts (cliché 15). En termes de dureté, on constate un adoucissement de la zone affectée thermiquement et une augmentation de la dureté de la passe extérieure de la soudure. Cette dernière peut être attribuée à la déformation importante qui a eu lieu dans cette région.

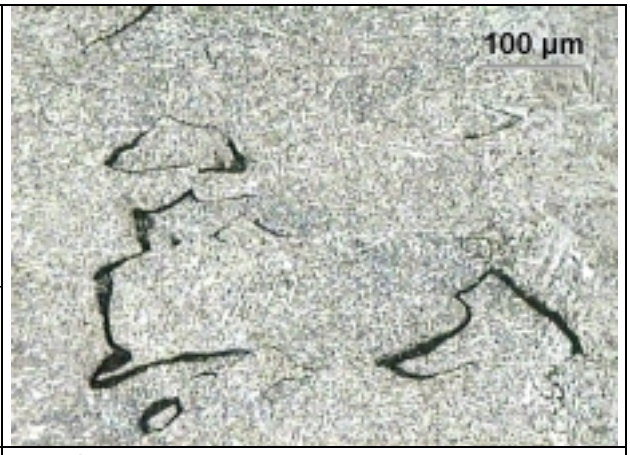


Cliché 15 : coupe transversale du joint soudé circulaire dans la partie chauffée

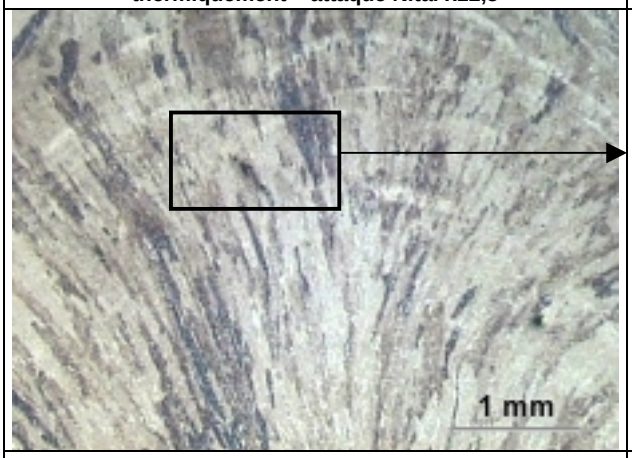
En microscopie optique, on remarque la présence de fissures dans la zone fondue de la passe extérieure, ainsi que dans la zone affectée thermiquement. Ces fissures entourent les grains grossiers résultant de l'opération de soudage (clichés 16 à 19). De tels défauts n'avaient pas été observés dans la partie saine de la soudure.



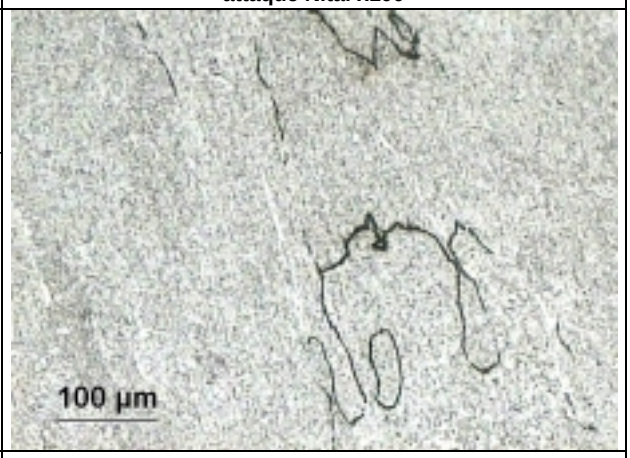
Cliché 16 : limite entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement – attaque Nital x12,5



Cliché 17 : fissures autour des grains de la zone fondue – attaque Nital x100

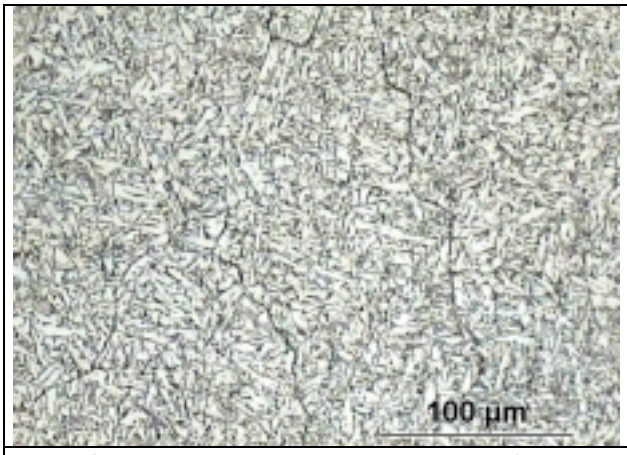


Cliché 18 : zone fondue de la passe extérieure – attaque Nital x12,5

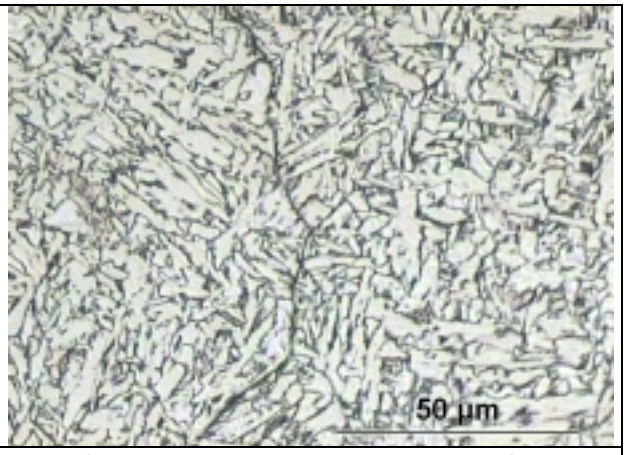


Cliché 19 : fissures autour des grains de la zone fondue de la passe extérieure – attaque Nital x100

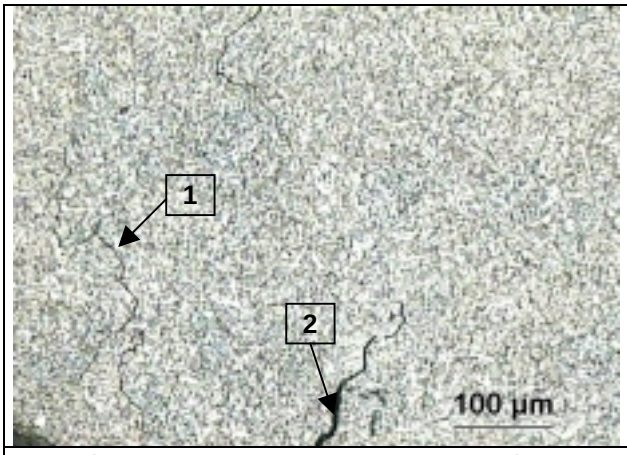
Une coupe longitudinale a également été pratiquée dans le cordon de soudure, dans la zone chauffée située sous la rupture. On constate que certains joints de grains de la passe extérieure sont particulièrement soulignés par l'attaque métallographique, sans pour autant être le siège de fissures (clichés 20 à 22).



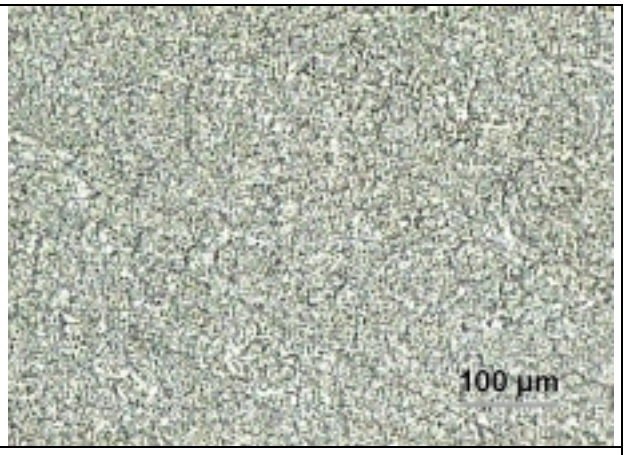
Cliché 20 : coupe longitudinale de la passe extérieure – attaque Nital x200



Cliché 21 : coupe longitudinale de la passe extérieure – attaque Nital x500



Cliché 22 : coupe longitudinale de la passe extérieure – attaque Nital x100
1 : joint de grain souligné - 2 : fissure au joint de grain

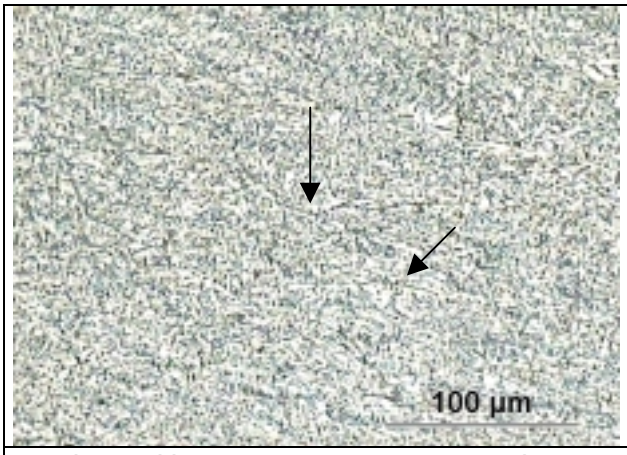


Cliché 23 : coupe longitudinale de la passe intérieure – attaque Nital x100

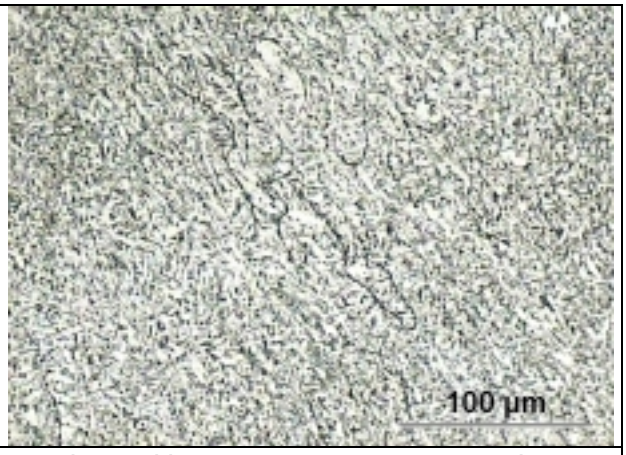
La microstructure de la passe intérieure n'est pas fondamentalement différente (cliché 23) : les grains basaltiques sont un peu moins apparents du fait du recuit qu'elle a subi lors de l'élaboration de la passe extérieure.

5.3. Elaboration des défauts du joint soudé circulaire:

L'attaque préférentielle des joints de grains basaltiques résulte probablement de la ségrégation à ces joints d'impuretés présentes en solution dans le matériau à l'issue de l'opération de soudage. Afin d'obtenir une estimation de la température nécessaire à la diffusion aux joints de grains de ces impuretés, des prélèvements de la soudure dans sa partie saine ont subi des revenus à des températures croissantes comprises entre 200°C et 500°C. Dès 200°C, on remarque l'attaque préférentielle de certains joints de grains (cliché 24), mais le phénomène atteint sa pleine mesure entre 350°C et 400°C (cliché 25). De plus, on constate que la peinture disparaît entre 300°C et 350°C, les parties chauffées ont donc été exposées à une température supérieure à 300°C.



Cliché 24 : Prélèvement de soudure saine revenu à 200°C – attaque Nital x200.



Cliché 25 : Prélèvement de soudure saine revenu à 400°C - attaque Nital x200

En revanche, on n'observe pas d'évolution de la dureté suite à ces revenus successifs.

5.4. Conclusions :

L'échauffement ne semble pas avoir eu d'influence néfaste sur le comportement des tôles constitutives des viroles. Au retour à l'ambiante, on constate qu'elles ont subi une légère perte de caractéristiques mécaniques.

En revanche, on observe des défauts dans le joint soudé, qui semblent liés à l'influence combinée de l'élévation de température et de la sollicitation mécanique. Ces défauts se présentent sous forme de fissures intergranulaires, qui résultent de la diffusion aux joints de grains d'impuretés présentes dans la matériau.

Des essais de réchauffement de la soudure saine à des températures croissantes montrent que le phénomène existe dès 200°C, température à laquelle la peinture conserve son intégrité. Il faut atteindre une température comprise entre 300°C et 350°C pour éliminer la peinture.

6. Examen des ruptures :

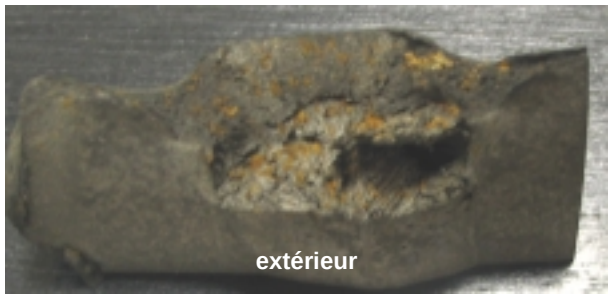
Lorsque l'on observe en vis à vis les deux lèvres de la zone de rupture en striction (clichés 26 et 27), on constate que des deux côtés, les tôles de la grande et de la petite virole se sont allongées au-delà de la rupture du joint soudé. C'est donc au niveau du joint soudé que la rupture s'est initiée, et les tôles ont subi un allongement plus important avant de rompre.

Cliché 26 : passe extérieure du joint soudé – prélèvement 4

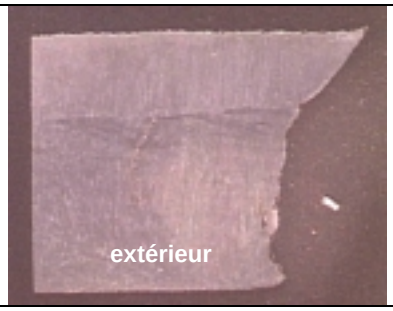
Cliché 27 : passe extérieure du joint soudé – prélèvement 5

6.1. Observation de la rupture du cordon de soudure

La rupture du cordon de soudure a été observée après décapage, sur le prélèvement 5 (cliché 28). La passe extérieure présente un faciès de rupture plan et fragile, contrairement à la passe intérieure, qui s'est déformée avant de rompre. Une observation en coupe longitudinale confirme la géométrie de la rupture(cliché 29).

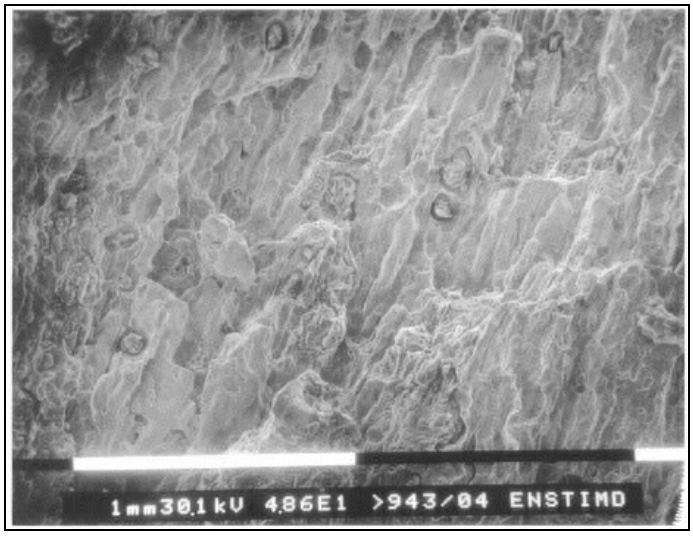


Cliché 28 : rupture du joint soudé après décapage



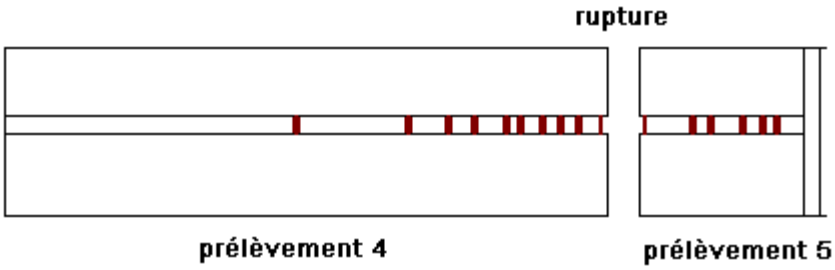
Cliché 29 : coupe longitudinale de la rupture

Au microscope électronique à balayage, la rupture plane semble s'être produite de façon intergranulaire, autour des joints de grains de la zone fondue (cliché 30).



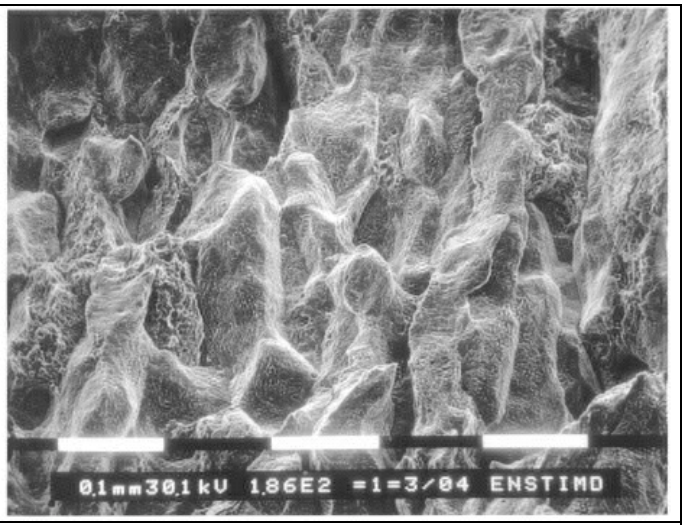
Cliché 30 : observation en microscopie électronique à balayage du faciès intergranulaire de la rupture plane

De nombreuses autres fissures du joint soudé sont visibles de part et d'autre de la rupture ; on constate toutefois que les fissures ne se sont pas propagées dans les tôles attenantes. Certaines de ces fissures ne sont pas traversantes, mais elles présentent toutes les mêmes caractéristiques, à savoir, rupture plane de la passe extérieure, et rupture en cisaillement de la passe intérieure (pour celles qui sont traversantes). La répartition de ces fissures apparaît sur le schéma ci-dessous :



La fissure la plus éloignée de la rupture sur le prélèvement 4 a été ouverte (cliché 31) afin d'observer le faciès de rupture en microscopie électronique à balayage(cliché 32). Cet examen confirme une rupture fragile de type intergranulaire pour la passe extérieure.

Cliché 31 : rupture fragile de la passe extérieure



Cliché 32 : rupture intergranulaire de la passe extérieure

Le caractère intergranulaire de la rupture est en accord avec les observations métallographiques de la microstructure de la passe extérieure de la soudure dans la zone chauffée. Ces observations montrent un épaississement des anciens joints de grains austénitiques de la zone fondue, et de la zone affectée thermiquement, que l'on a attribué à la ségrégation d'impuretés.

La composition chimique du cordon de soudure a été analysée par spectroscopie dans les parties saine et chauffée, ainsi que pour les passes intérieure et extérieure. Les teneurs massiques apparaissent dans le tableau 6 ci-dessous :

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	V	Ti
non chauffée intérieure	0,12	0,42	1,45	0,012	0,004	0,02	0,03	0,06	0,22	0,02	0,025	0,08	0,03
non chauffée extérieure	0,12	0,39	1,44	0,012	0,004	0,02	0,03	0,06	0,22	0,02	0,080	0,08	0,03
chauffée intérieure	0,12	0,43	1,43	0,012	0,005	0,02	0,03	0,06	0,23	0,02	0,025	0,08	0,03
chauffée extérieure	0,13	0,41	1,45	0,012	0,005	0,02	0,03	0,06	0,20	0,02	0,025	0,08	0,03

Tableau 6 : composition chimique du joint soudé

La composition chimique du cordon de soudure est la même tout au long du joint soudé. Aucune différence de composition chimique n'explique la différence de comportement entre la passe intérieure et la passe extérieure.

La seule différence existant entre les deux passes du cordon de soudure est le fait que la passe intérieure a subi un recuit lors de l'élaboration de la passe extérieure. La passe extérieure est restée quant à elle brute de soudage, elle n'a pas subi de recuit, conformément à la dispense de traitement thermique octroyée au fabricant de la citerne.

En général, un recuit de détente est préconisé après soudage dans le but d'éliminer les contraintes résiduelles liées à l'opération de soudage. Toutefois, la composition chimique de cet acier est réputée ne pas favoriser un niveau de contraintes résiduelles élevé lors d'un telle opération. Par ailleurs, un recuit de détente, habituellement effectué à une température de l'ordre de 600°C, ferait chuter les caractéristiques mécaniques du matériau, probablement par coalescence des fins carbures et/ou

nitrures de vanadium formés à haute température. On constate en effet ici que l'échauffement dû à l'incendie a fait chuter les caractéristiques mécaniques du matériau en dessous des valeurs minimales indiquées dans la norme.

Afin de ne pas laisser le cordon de soudure brut de soudage sans toutefois diminuer les caractéristiques du matériau, on pourrait envisager d'effectuer un traitement de normalisation sur la totalité de l'assemblage soudé, mais dans ce cas, ce sont les caractéristiques mécaniques du cordon de soudure qui chuteraient : en effet, il contient moins de carbone, moins de vanadium, et la taille du grain est plus importante. La dureté du cordon de soudure est due à sa microstructure, issue d'un refroidissement rapide, et elle serait gommée lors d'une normalisation. C'est pourquoi aucun post-traitement thermique ne peut être préconisé dans la fabrication de cette citerne.

6.2. Mécanisme de la rupture du cordon de soudure

Des essais de pliage du joint soudé prélevé longitudinalement dans la partie réputée saine et la partie chauffée ne montrent pas de fragilisation de la soudure chauffée après retour à l'ambiante. La passe extérieure, sollicitée en traction lors des essais de pliage, se déforme convenablement dans les deux cas.

Il semble que ce soit la concomitance du phénomène de diffusion aux joints de grain et de la sollicitation mécanique qui soit à l'origine de la rupture intergranulaire du joint soudé. Ce phénomène est connu sous le nom de fissuration au réchauffage. Il se produit lors du traitement de réchauffage post-soudage et affecte les grains grossiers de la zone fondue et de la zone affectée thermiquement. Il est réputé affecter des aciers dont la résistance mécanique est relativement élevée, ce qui induit un niveau de contraintes résiduelles de soudage également élevé. Les aciers faiblement alliés au Cr, Mo, V, réputés soudables par ailleurs, sont particulièrement sensibles à ce phénomène, qui nécessite de prendre des précautions particulières lors de l'opération de soudage.

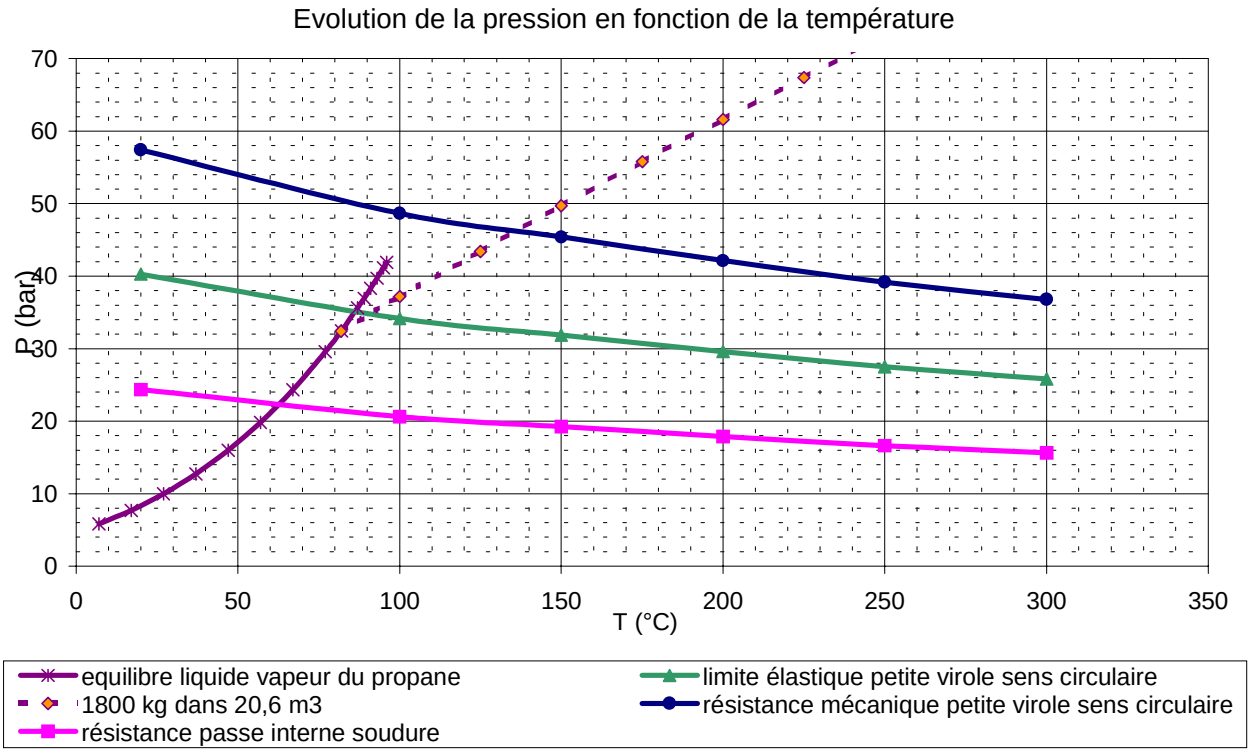
L'acier constitutif de la citerne et le métal d'apport ont une faible teneur en carbone, et sont très faiblement alliés, respectivement au vanadium et au molybdène. Ainsi, il est probable que les contraintes résiduelles résultant de l'opération de soudage ne sont pas très élevées. Toutefois, au cours de l'incendie, des sollicitations mécaniques complexes ont pu se produire et conduire au phénomène de fissuration au réchauffage.

6.3. Evaluation des contraintes au cours de l'incendie.

Avant l'accident, le volume de propane liquide dans la citerne est estimé à 3150 l, ce qui correspond à une masse (phase liquide et phase gazeuse) d'environ 1800 kg et à une hauteur de liquide d'environ 50 cm, si l'on considère que la citerne est horizontale. La rupture du joint soudé se produit pour une hauteur équivalente de liquide de 17 cm. Au cours de l'incendie, la paroi externe du joint soudé a pu atteindre une température de l'ordre de 350°C, comme en témoigne la disparition de la peinture. Pendant ce temps, la paroi interne, au contact du gaz liquéfié froid, a pu "réguler" sa température par vaporisation du liquide, ce qui a créé un important gradient de température dans le joint soudé. La dilatation contrariée de la passe extérieure du joint soudé peut être à l'origine de l'augmentation de dureté que l'on a constatée, qui n'est pas liée aux seuls phénomènes de précipitation au cours du

chauffage. Les contraintes liées à ce gradient de température ont pu s'ajouter aux contraintes de soudage et provoquer la fissuration de la passe extérieure.

Après la rupture fragile de la passe extérieure, seule la passe intérieure supporte la pression interne. Son épaisseur minimale peut être estimée à environ 3,5 mm. Sa résistance mécanique à l'ambiante, estimée à partir de l'essai de dureté, est de 800 MPa. En supposant que la résistance mécanique de la passe interne de la soudure a la même variation en fonction de la température que la limite élastique du P460NG1, on peut calculer l'évolution de la pression limite de rupture de la passe interne en fonction de la température, et la comparer à l'évolution de la pression interne dans la citerne. Celle-ci est calculée en supposant tout le propane à la même température, tout d'abord en suivant la courbe d'état, puis en considérant que la masse volumique est constante, cette dernière dépendant de couples (pression, température).



Graphe 1 : évolution de pression en fonction de la température.

D'après le graphe 1 ci-dessus, la pression de rupture du joint soudé (obtenue par le produit de la résistance par l'épaisseur, divisé par le rayon de la citerne) serait de l'ordre de 22 bars, et elle serait atteinte pour une température homogène de la masse de propane et de la passe intérieure de la soudure de l'ordre de 65°C. On voit ici les limites du calcul. En effet, il est probablement abusif de considérer que tout le propane s'est échauffé jusqu'à 65°C, dans la mesure où l'échauffement de la citerne reste localisé. De plus, l'effet d'entaille dû à la fissuration de la passe extérieure de la soudure crée une concentration de contraintes susceptible de diminuer la pression nécessaire à la rupture.

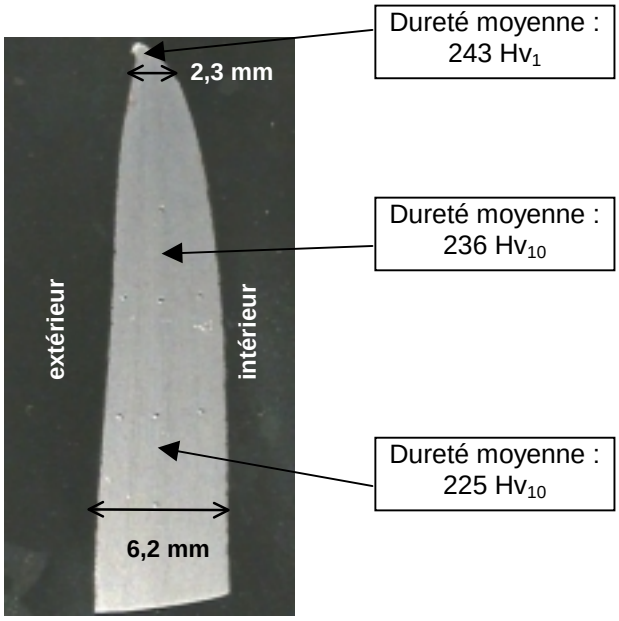
Néanmoins on constate que l'augmentation de pression dans la citerne nécessaire à la rupture du joint soudé n'a pas été très importante.

Par ailleurs, ce calcul, moyennant l'hypothèse très simplificatrice d'une température homogène dans le système considéré, montre que les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé auraient été suffisantes pour contenir l'augmentation de température et de pression qui aurait conduit à la vaporisation de la totalité du propane présente dans la citerne, évitant ainsi le BLEVE.

6.4. Examen de la rupture "en striction"

Après l'amorçage dans le joint soudé, la rupture s'est propagée sous l'effet de la surpression due à l'explosion. De part et d'autre du joint soudé, sur une longueur de 50 cm environ, on constate que les tôles ont subi une importante striction avant de rompre en cisaillement.

Sur le prélèvement que nous avons effectué (cliché 33), l'épaisseur restante avant la rupture par cisaillement est de 2,3 mm. La diminution d'épaisseur est importante et a lieu sur une faible distance (environ 10 cm depuis les lèvres de la rupture). Toutefois, l'allongement constaté (de l'ordre de 2%) est beaucoup plus faible que celui que l'on mesure à partir des essais de traction (20% mini). Mais il est possible que le joint soudé ait eu un effet de bridage sur la déformation des tôles avoisinantes. De plus comme cette zone était soumise à un échauffement, la striction s'est rapidement localisée à l'endroit de moindres caractéristiques mécaniques. On remarque toutefois une augmentation de dureté, localisée dans la partie la plus fortement déformée.



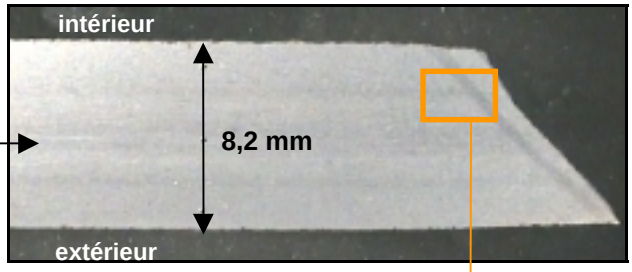
Cliché 33 : coupe longitudinale dans une zone de striction

Les caractéristiques de cette rupture ne remettent pas en cause la chronologie des la rupture telle que supposée jusqu'à présent.

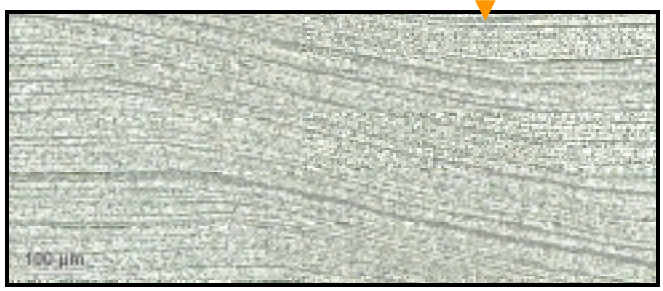
6.5. Examen de la rupture "en cisaillement"

Sur la majeure partie de la rupture de la citerne, on observe du cisaillement à 45°, comme illustré sur les clichés 34 et 35.

Dureté moyenne : 248 Hv_{10}.



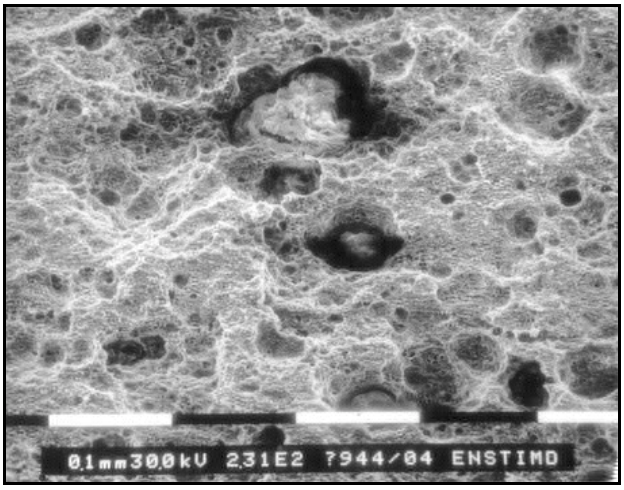
Cliché 34 : Rupture à 45°



Cliché 35 : déformation en cisaillement dans l'épaisseur de la tôle, sous la rupture.

Cette déchirure s'est produite presque sans déformation préalable (on remarque une faible striction sous la rupture). Les relevés d'épaisseur dans cette zone montrent que la diminution d'épaisseur par rapport à l'épaisseur nominale minimale, bien que peu importante, affecte une distance de l'ordre de 25 cm depuis les lèvres de rupture. Cela se traduit par une augmentation notable de la dureté dans les zones déformées.

Malgré l'état d'oxydation avancé des lèvres de rupture, après décapage, on peut voir que le faciès est ductile à cupules (cliché 36).



Cliché 36 : faciès de rupture ductile à cupules.

Là encore, ces caractéristiques correspondent à une rupture qui s'est produite par déchirement sous l'effet d'une surpression violente, au moment de l'explosion, et sont conformes aux hypothèses émises.

6.6. Conclusions

L'examen des ruptures montre que l'amorçage s'est produit au niveau du joint soudé. La passe extérieure, parce qu'elle n'a pas été recuite, a rompu fragilement de façon intergranulaire. Ce phénomène est connu sous le nom de fissuration au réchauffage. Le niveau de contraintes nécessaire à la mise en œuvre de ce phénomène a été obtenu par l'important gradient de température existant entre les deux passes du joint soudé au niveau du point chaud.

La passe intérieure, d'épaisseur minimale 3,5 mm, a cédé sous l'effet de la pression interne, de façon ductile, après s'être déformée.

Puis sous l'effet de la surpression due à la vaporisation du propane liquide restant dans la citerne, la rupture s'est propagée, provoquant un arrachement en cisaillement des tôles, précédé de striction dans les zones chauffées.

Il n'a pas été possible de déterminer si les autres fissures du joint soudé se sont ouvertes avant ou après l'explosion.

Conclusion générale:

Les examens pratiqués sur les parties réputées saines de la citerne montrent que le matériau est conforme aux exigences de la norme dont il relève, en termes de composition chimique, microstructure et caractéristiques mécaniques.

La soudure circulaire entre les deux parties de la virole de la citerne est une soudure en X qui a été réalisée en deux passes. Elle ne comporte pas de défauts.

La rupture n'a pas de lien direct avec la sollicitation mécanique subie lors de l'impact avec l'autre ensemble routier. A l'endroit de l'impact, la citerne s'est déformée selon en enfoncement angulaire qui est encore visible.

En revanche, la rupture est en lien direct avec l'incendie qui a suivi la collision, et qui a échauffé en premier lieu la partie basse de la citerne au niveau du joint soudé entre les viroles.

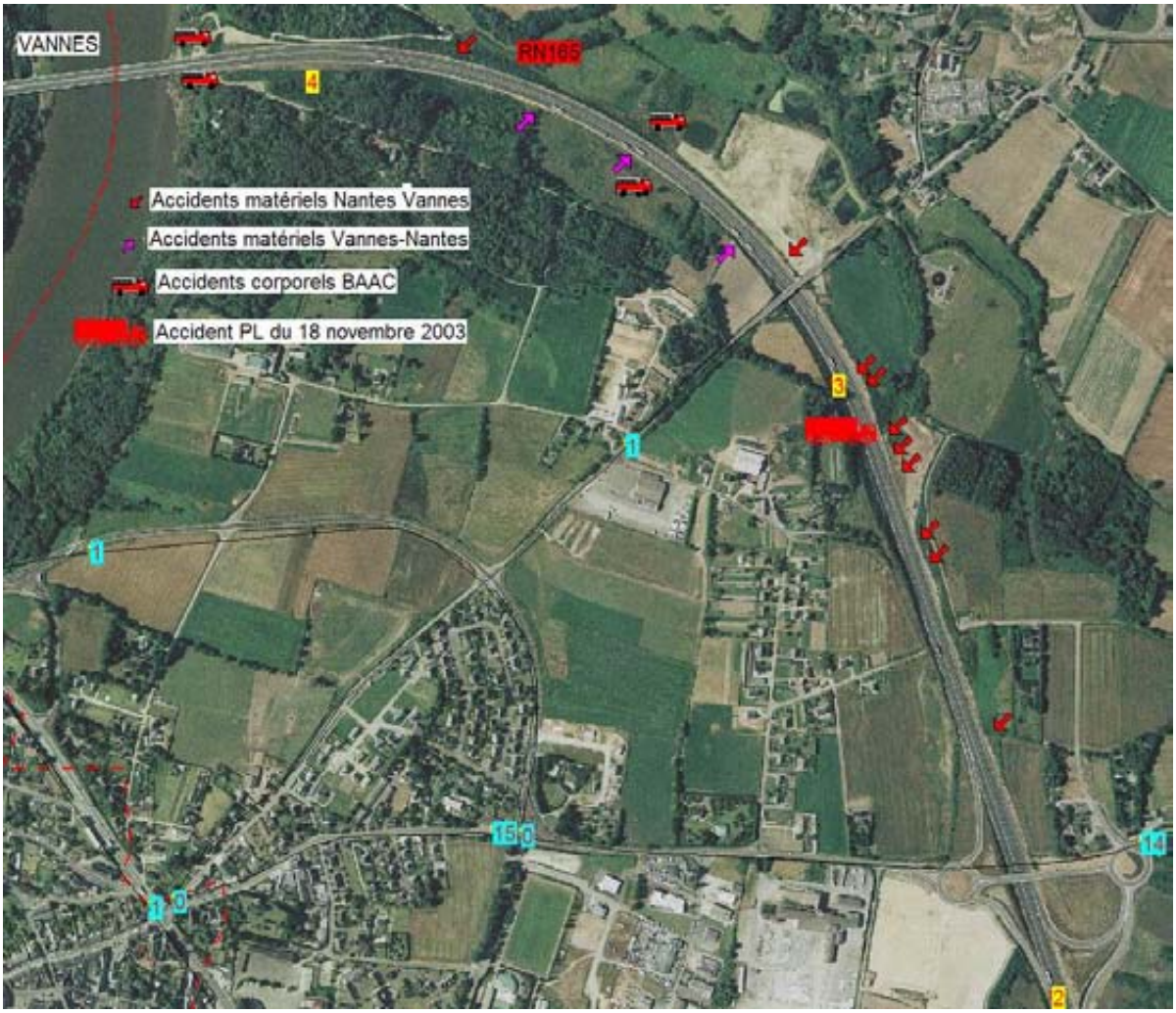
La passe extérieure de celui-ci, qui n'avait pas subi de traitement de recuit, a rompu fragilement par un phénomène de fissuration au réchauffage. L'épaisseur restante n'a pu contenir la pression interne et a cédé, ce qui a été à l'origine du fort sifflement accompagnant la fuite de gaz par ce petit orifice.

Suite à la dépressurisation, le propane liquide restant dans la citerne s'est vaporisé créant une surpression violente et la propagation de la déchirure.

Dans ces circonstances particulières, un moyen d'éviter le BLEVE, ou tout du moins de retarder la rupture du réservoir, serait d'utiliser un matériau dont les caractéristiques mécaniques seraient garanties après recuit de détente, et d'effectuer un traitement de détente sur le joint soudé.

A. MOUFTIEZ

Annexe 6 : Accidents sur la RN 165 de 1996 à 2002



Annexe 7 : Références bibliographiques

- Analyse des risques associés au transport de matières dangereuses
  J.F. LECHAUDEL, F. MASSON
  INERIS, Laboratoire d'études de sécurité et d'analyse des accidents, Département Evaluation – Modélisation - Analyse des risques
  Janvier 1995 – Décembre 1997
  123 pages

- Les accidents de Gaz Liquéfiés (Le BLEVE)
  J.M. FAUCHER, D. GICQUEL, G. MARLIER, J.L. PY, P. WIEDEMANN
  Groupe d'Etudes de Sécurité de l'Industrie Pétrolière (GESIP)
  Rapport n°91/05 (révision du rapport 90/02)
  114 pages

- Accident routier du 9 mai 2000 survenu à Bordes (64)
  M. CAUMONT
  INERIS, Direction des risques accidentels, unité identification et hiérarchisation des risques
  Mars 2001
  123 pages

- Etude sur le retour d'expérience du transport routier de marchandises dangereuses (hydrocarbures liquides et GPL)
  Q. GISSELMANN, T. TIXIER
  EADS APSYS
  9 novembre 2001
  52 pages

- Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006), Le BLEVE, Phénoménologie et modélisation des effets thermiques
  E. LEPRETTE
  INERIS, Direction des risques accidentels
  Septembre 2002
  136 pages

- La prévention des risques liés au transport de matières dangereuses
  L. BARBAROUX, F. BARTHELEMY, B. DESBAZEILLE, H. LEGRAND
  Conseil Général des Ponts et Chaussées, Conseil Général des Mines, Inspection Générale de l'Environnement
  Rapport n°2003-0061-01
  31 mars 2003
  27 pages