

RAPPORT D'ÉTUDE
DRA-07-85166-17188A - Version C

16/12/2008

**Référentiels, guides de bonnes pratiques et
modes de gestion du REX dans la prévention
des projections explosives de métal en fusion**

INERIS

Référentiels, guides de bonnes pratiques et modes de gestion du REX dans la prévention des projections explosives de métal en fusion

Programme Etude et Recherche DRA 71

RAPPORT FINAL

Client : BARPI, MEEDAT

Liste des personnes ayant participé à l'étude : S. EVANNO

Réf. : DRA-07-85166-17188A

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	S. EVANNO	M.A. KORDEK	Y. MACE
Qualité	Ingénieur Unité Sécurité des Procédés Direction des Risques Accidentels	Déléguée Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels	Directeur Direction des Risques Accidentels
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	7
2. PRESENTATION DES INSTALLATIONS PRESENTES EN INDUSTRIE	9
3. RETOUR D'EXPERIENCE ET BILAN DES SCENARIOS DES ACCIDENTS METTANT EN ŒUVRE UN CONTACT EAU/METAL EN FUSION	15
3.1 Bilan du retour d'expérience issu du BARPI.....	15
3.2 Cas concrets d'explosions d'aluminium dues à un contact intempestif de l'aluminium liquide avec de l'eau.....	16
3.2.1 Lors du chargement des fours	16
3.2.2 Lors de l'élaboration dans les fours	17
3.2.3 Lors de la coulée	17
3.3 Etat des connaissances sur les accidents autres que ceux dus à un contact intempestif aluminium liquide – eau	17
3.3.1 Lors de la préparation des charges	18
3.3.2 Lors de l'élaboration	18
3.3.3 Lors de la coulée	19
3.3.4 Conclusion.....	19
3.4 Bilan des scénarios d'accidents	19
4. PHENOMENOLOGIE MISE EN CAUSE DANS UN CONTACT EAU/METAL EN FUSION	21
4.1 Mécanisme et conditions d'apparition d'explosions dues à un contact intempestif métal liquide - eau.....	21
4.2 approche thermodynamique des projections explosives	23
5. INVENTAIRE DES GUIDES DE BONNES PRATIQUES PUBLIES POUR LA PREVENTION DES ACCIDENTS METTANT EN ŒUVRE UN CONTACT EAU/METAL EN FUSION.....	29

5.1	Projections explosives de métal liquide dans les fonderies d'aluminium, causes et préventions (INRS).....	29
5.2	Recueil de directives pratiques sur la sécurité et la santé dans l'industrie du fer et de l'acier	30
5.3	Bilan des contenus des inventaires de bonnes pratiques	31
6.	BONNES PRATIQUES PROFESSIONNELLES INDUSTRIELLES	33
6.1	AFFINERIE AFFIMET (GROUPE ALCAN) – COMPIEGNE (Oise)	33
6.2	ACIERIE DE L'ATLANTIQUE (ADA) – Boucau (Pyrénées-Atlantiques).....	36
7.	CONCLUSION	41
8.	REFERENCES.....	43
9.	LISTE DES ANNEXES	45

GLOSSAIRE

DRA : Direction des Risques Accidentels (INERIS)

Eboutage : sciage d'une ou des deux extrémités d'un produit de fonderie

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

Mitraille : Ensemble de menus déchets de métal ou d'alliage

OIT : Organisation Internationale du Travail

POI : Plan d'Opération Interne

Poteyage : En métallurgie, dépôt d'un film réfractaire pour obtenir un écran protecteur

QSE : Qualité Sécurité Environnement

Sow : Lingot de récupération

1. INTRODUCTION

Le Programme d'Etude & Recherche DRA 71 (« Evaluation des risques accidentels liés aux procédés dangereux et aux installations fixes et mobiles ») a pour objet de permettre une meilleure exploitation de la richesse des enseignements qui peuvent être tirés des accidents d'un point de vue technique et humain.

Sur le plan réglementaire, le décret 1133 du 21/09/1977 et la transcription en droit français de la Directive Seveso II avec le système de gestion de la sécurité, ont donné des leviers à l'Administration pour contrôler la prévention et la maîtrise des risques sur la base des activités de retour d'expérience. A ce titre, une collaboration avec le BARPI, sur des sujets de travail choisis en commun, est développée.

Ce rapport en lien avec le programme de recherche DRA71 (Opération *A1 : règles de sécurité pratiquées dans des secteurs industriels ou des procédés de fabrication*) vise à développer l'expertise de l'INERIS en matière de retour d'expérience en analysant l'intégration du retour d'expérience dans l'évolution des règles de sécurité pratiquées par les industriels en France et à l'étranger.

Cette opération consiste à produire de la connaissance sur les règles de sécurité retenues et publiées par les professionnels à l'étranger. Ces mesures découlent en général de leur propre retour d'expérience et traduisent un certain niveau de sécurité adopté dans l'exploitation de leurs installations.

Son déroulement intéresse les phases suivantes :

- recherche bibliographique de règles publiées et faisant référence pour l'ensemble de la profession considérée,
- analyse de l'influence de l'accidentologie sur l'évolution de règles de sécurité et des dispositions retenues pour assurer leur mise à jour avec le retour d'expérience disponible,
- analyse avec quelques enquêtes à l'étranger, des pratiques opérées dans des sites représentatifs de la thématique considérée.

Avant d'effectuer une description générale des installations de fonderie de métal, il faut noter que l'on ne traitera que des cas des fonderies d'aluminium et de l'acier, sachant que ce sont les domaines les plus répandus et les plus touchés par des accidents graves mettant en cause un contact eau/métal en fusion. L'accidentologie montre qu'il se produit également des sinistres dans l'industrie de fusion du cuivre, du magnésium ou encore du zirconium. En juin 2002, dans une usine de production de cuivre australienne, 100 tonnes de cuivre en fusion sont entrées en contact avec de l'eau, générant une grande explosion. Ces phénomènes restent identiques au contexte près de ces activités spécifiques, lesquelles n'ont pas été intégrées dans le cadre de cette étude.

Dans le présent rapport, nous décrivons le retour d'expérience relatif au sujet traité, relatif aux accidents « eau / métal en fusion », dans le domaine de la métallurgie. En effet, dans cette thématique, des projections explosives, parfois très violentes, peuvent se produire lorsque du métal liquide vient au contact de l'eau de manière intempestive.

Ce phénomène, considéré comme peu fréquent aujourd'hui, a pourtant eu lieu une trentaine de fois au cours de ces vingt-cinq dernières années, comme le précise l'annexe 1 listant les accidents liés à une explosion due à un contact eau /métal en fusion enregistrés entre 1981 et fin 2005.

Après une brève présentation des installations dans lesquelles peut se produire ce phénomène, nous détaillerons la phénoménologie et de quelle manière l'énergie libérée peut être déterminée, puis nous présenterons et analyserons des guides de bonnes pratiques en matière de prévention de ce type d'accident qui ont été publiés en France et aussi à l'étranger. Enfin, une comparaison sera effectuée entre les recommandations préconisées par ces guides et l'organisation de certaines entreprises dans lesquelles nous avons fait un déplacement afin de recueillir des données sur leurs procédures.

2. PRESENTATION DES INSTALLATIONS PRESENTES EN INDUSTRIE

Différents moyens de chauffage des fours de fusion sont utilisables : le gaz, le fuel, le coke ou l'électricité. Dans tous les cas, le four est composé de matériaux réfractaires permettant de l'isoler du milieu ambiant, et contient un creuset en graphite. Ce creuset, rempli de lingots et de jets, est porté à une température supérieure à la température de fusion de l'alliage qu'il contient. La régulation de température est effectuée à l'aide de thermocouples placés dans la chambre de chauffe, entre les résistances (cas d'un four électrique) et le creuset. La température de cette chambre est légèrement supérieure à celle du métal contenu dans le creuset.

Le métal fondu est ensuite récupéré par le basculement du four ou à l'aide d'un bec de coulée situé au bas du four.

Dans tous les cas, on aménage une fosse sous le four et un canal en bas du four afin de recueillir le métal en cas de rupture du creuset. Ce genre d'accident, bien que peu fréquent, subsiste néanmoins. Si le four a été bien conçu, il se répare en remplaçant le creuset, et parfois en remplaçant aussi quelques résistances détruites par le métal en fusion qui peut avoir coulé dessus. Pour maîtriser ce type d'incident, on détermine généralement une périodicité de remplacement des creusets, qui sont considérés, dans une fonderie, comme des pièces d'usure.

Dans le domaine de la fonderie de l'aluminium, on distingue un tronc commun allant du four de fusion au dispositif de filtrage et une diversification des procédés allant de la coulée semi-continue verticale à la coulée de la pièce. Le synoptique présent dans le schéma 1 permet d'illustrer tous les types d'actions pouvant avoir lieu lors de l'opération de chargement et de coulée de l'aluminium.

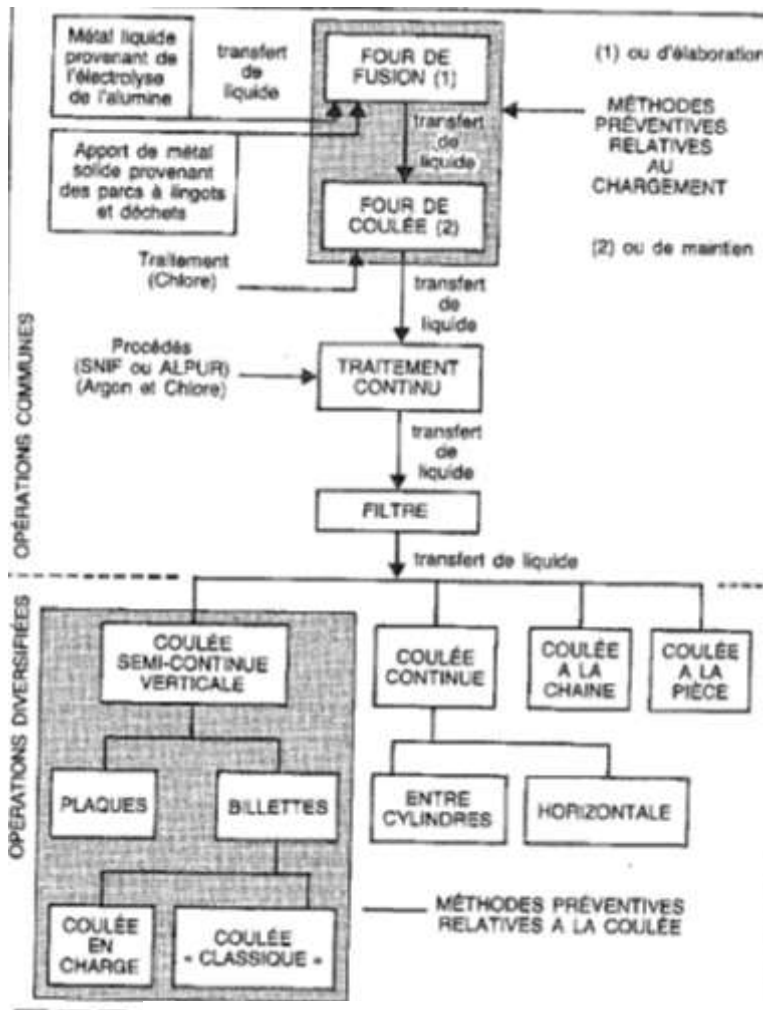


Schéma 1 : Synoptique des méthodes de coulée dans une fonderie d'aluminium (INRS)

Une installation de coulée semi-continue verticale peut être communément représentée selon le schéma suivant :

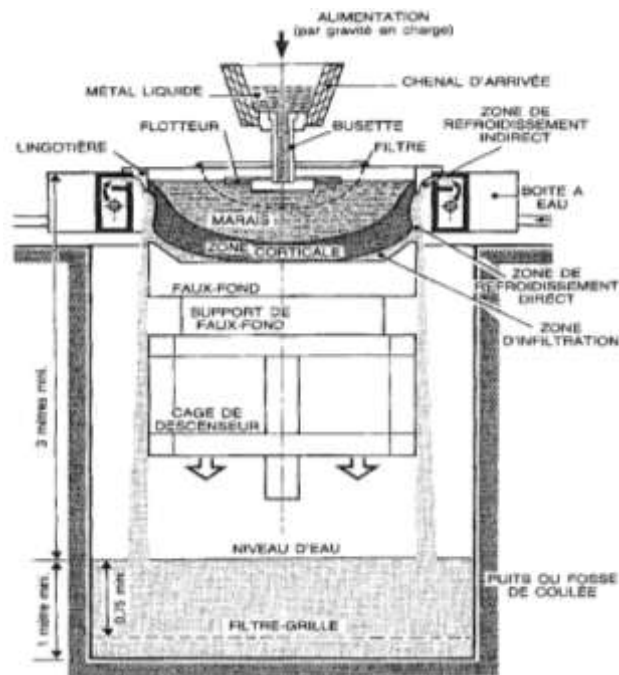


Schéma 2 : Installation de coulée semi-continue (INRS)

Le métal est introduit sous forme liquide ou solide par gravité ou par charge. Il est ensuite porté à la température de fusion avant d'être refroidi en partie basse de l'installation puis évacué.

Dans une aciérie, on peut représenter les différentes opérations ayant lieu au cours de la coulée à l'aide du synoptique ci-dessous, dans lequel on distingue deux modes d'obtention de métal fondu (par four électrique ou convertisseur).

Le schéma 3 présente des méthodes de coulée dans une aciérie :

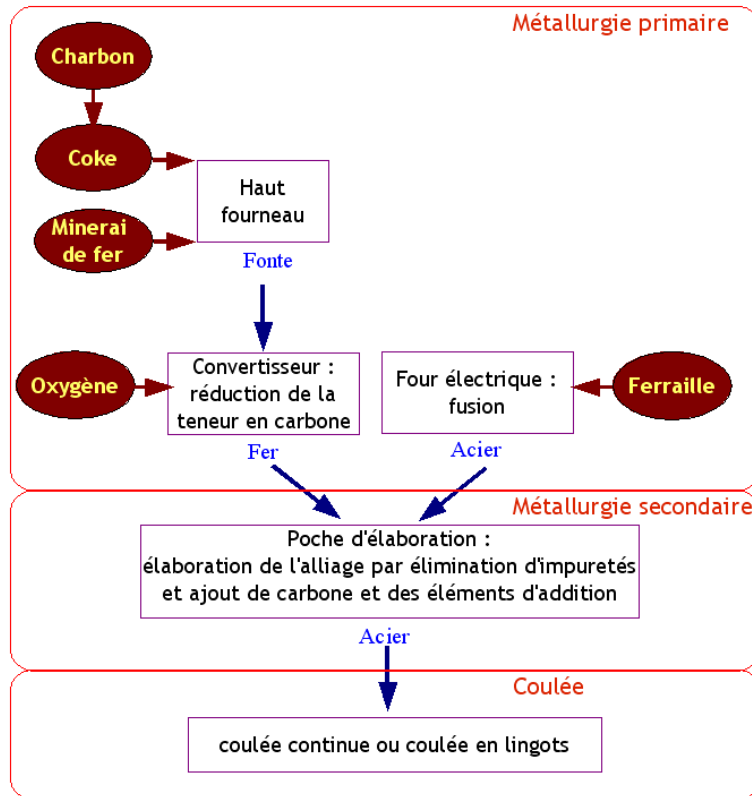


Schéma 3 : Synoptique des méthodes de coulée dans une aciérie (INRS)

On peut citer comme exemple de four de fusion, le four électrique à arcs, constitué de quatre parties principales, la cuve, l'équipement électrique, le garnissage réfractaire et des annexes disposées autour de la cuve (système de dépollution, système de chargement etc.).

Le schéma 4 représente la cuve et ses annexes.

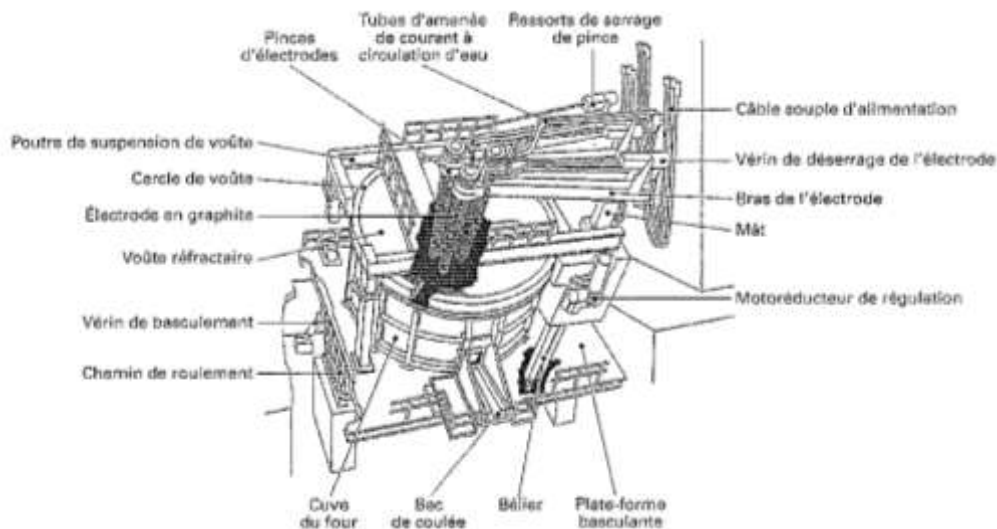


Schéma 4 : Vue d'un four de fusion électrique à arcs (INRS)

La matière première est constituée de ferrailles de récupération de diverses origines. Les ferrailles sont chargées dans un four avec de la chaux puis fondues à l'aide d'un très puissant arc électrique formé entre les électrodes en graphite. La température au sein de l'arc atteint plusieurs milliers de degrés, de sorte que les ferrailles qui entrent en contact avec lui sont instantanément vaporisées. Pour homogénéiser le mélange et accélérer la fusion, des sources d'énergie d'appoint sont utilisées, comme des brûleurs intégrés dans les parois du four ou des lances à oxygène.

Pendant cette première étape, on procède à ce qu'on appelle la métallurgie primaire, c'est-à-dire qu'on se débarrasse des éléments indésirables contenus dans les ferrailles, et qu'on procède à un premier ajustement de la teneur du bain en carbone et autres éléments souhaités.

Ainsi, sous l'action de l'oxygène, les différentes impuretés présentes dans le bain forment des oxydes puis se lient avec la chaux qui avait été introduite dans le four. Ces composés, plus légers que l'acier, surnagent au-dessus du bain et forment ce qu'on appelle le laitier.

Les principales zones où il y a un risque d'explosion lié à un contact eau/métal en fusion sont le four de fusion refroidi continuellement par tubulures dans lesquelles de l'eau circule et la poche qui récupère le métal liquide sortant du four de fusion au moment de la coulée continue qui se fait dans des bombonnes de cuivre chauffées par eau. Une fosse de sécurité est également présente pour récupérer le métal liquide en cas de fuite.

Cette fosse étant située à proximité de câbles électriques et de canalisations d'O₂ sous pression, des risques importants y demeurent. Au niveau de la fosse de sécurité située en dessous de la poche, des scories chaudes sont placées à l'intérieur afin d'éviter tout dépôt d'humidité pouvant provoquer une explosion de métal liquide.

3. RETOUR D'EXPERIENCE ET BILAN DES SCENARIOS DES ACCIDENTS METTANT EN ŒUVRE UN CONTACT EAU/METAL EN FUSION

De nombreux cas concrets de projections explosives plus ou moins violentes ont été signalés dans le domaine de la métallurgie, de la fonderie et de l'aciérie entre autres et sont présentés dans ce chapitre.

Ces projections explosives, qui se produisent lorsque du métal liquide parvient au contact de l'eau de façon intempestive, peuvent se manifester sous deux formes distinctes :

- les projections de métal, lorsque des phénomènes purement physiques, dus à la vaporisation instantanée d'eau, provoquent des projections vives de masses de métal liquide à quelques mètres des installations et exposent ainsi les opérateurs à un risque de brûlures graves ;
- les explosions très violentes, comparables, d'après leurs effets, à celles de plusieurs kilogrammes de TNT (trinitrotoluène), dues à des phénomènes physico - chimiques plus complexes ; les personnes exposées à ces explosions catastrophiques sont généralement mortellement blessées et les installations très gravement endommagées.

Ces phénomènes ont suscité un programme permanent de recherches fondamentales dans les divers pays producteurs. Ces recherches et l'expérience acquise dans les fonderies notamment ont permis de définir les conditions d'apparition de projections explosives d'aluminium décrites dans le chapitre 4.

3.1 BILAN DU RETOUR D'EXPERIENCE ISSU DU BARPI

Dans le domaine de la sidérurgie et de la fonderie, des projections de métal liquide et une forte explosion parfois très violente se produit généralement lorsque du métal liquide entre en contact avec de l'eau lors des opérations de coulées et de manutention. Une trentaine de cas ont été recensés sur la base de données ARIA gérée par le BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles).

Les accidents issus de la base ARIA du BARPI décrivent des explosions eau/métal en fusion sont présentés en annexe 1 (ils présentent aussi bien des accidents survenus en France et à l'étranger). Ce phénomène, considéré comme peu fréquent aujourd'hui, a pourtant eu lieu une trentaine de fois au cours de ces vingt-cinq dernières années, comme le précise l'annexe 1 listant les accidents liés à une explosion due à un contact eau /métal en fusion enregistrés entre 1981 et fin 2005.

Dans le cas d'une explosion due à un contact entre de l'eau et du métal en fusion, on peut distinguer deux phases :

- La première phase correspond à un incident technique généralement lié à l'erreur d'un opérateur (n° 3924, 12875, 21914), une défaillance de matériel (n° 95, 8044, 23912, 26928) ou encore un accident périphérique aux installations d'eau et de métal en fusion (n°104, 23317) (*les numéros font référence aux accidents présentés en annexe 1*).
- La deuxième phase est le contact de l'eau avec le métal fusion, l'un des deux éléments ayant été libéré par accident lors de l'incident de la première phase. Ce contact eau/métal en fusion génère ainsi une explosion projetant le métal en fusion à plusieurs mètres, occasionnant d'importants dégâts matériels comme ce fut le cas à Commeny en 1994 (4 semaines de chômage technique) ainsi que d'importants dégâts humains comme le montre l'exemple récent de 2005 à Kapfenberg en Autriche où 5 personnes sont décédées suite à une explosion de métal liquide.

Au vu de la rapidité de la réaction, l'intervention des secours ne se fait qu'après le sinistre. Ils agissent principalement sur les personnes blessées et sur les incendies qui se sont déclarés à partir des projections de métal liquide dues à l'explosion, ceci afin d'éviter le risque d'expansion du sinistre.

Des mesures de sécurité ont été prises au fur et à mesure des années afin d'éviter de nouveaux incidents liés à un contact eau/métal en fusion. Les mesures techniques varient en fonction des caractéristiques du site et de l'incident, mais on retrouve dans chaque cas, un souci d'amélioration du management organisationnel au sein du site.

3.2 CAS CONCRETS D'EXPLOSIONS D'ALUMINIUM DUES A UN CONTACT INTEMPESTIF DE L'ALUMINUM LIQUIDE AVEC DE L'EAU

Nous présentons une sélection de quelques cas concrets d'accidents ou d'incidents dus à des projections explosives dues à un contact métal en fusion – eau.

3.2.1 LORS DU CHARGEMENT DES FOURS

Des chutes de sciage, stockées dans une benne non couverte et située à l'extérieur, par temps de pluie, ont été introduites dans un four contenant un pied de bain de 5 tonnes ; une explosion s'en est suivie.

Un sow d'aluminium ferreux provenant d'un parc externe non couvert fut poussé à l'intérieur d'un four dont les portes furent fermées immédiatement. L'explosion qui survint peu après a entraîné des dégâts matériels importants et l'immobilisation du four pendant deux mois.

Une projection de métal sur l'engin de chargement s'est produite suite à l'enfournement de générateurs d'aérosols et de canettes humides contenus dans des bennes de stockage de chutes d'aluminium.

3.2.2 LORS DE L'ELABORATION DANS LES FOURS

L'élaboration consiste à enfourner les charges préparées, puis de les fondre, afin de travailler le métal liquide dans le four, pour extraire et traiter les crasses chaudes.

La percée du réfractaire et du circuit de refroidissement à l'eau par du métal surchauffé emprisonné dans les crasses des parois a entraîné l'explosion et la destruction d'un four à induction à creuset et soufflé la toiture de l'atelier.

L'introduction dans un four d'un racle de brassage ayant séjourné par temps humide a provoqué une explosion. Celle-ci par projection de métal a légèrement brûlé un opérateur travaillant dans l'axe de la porte du four.

3.2.3 LORS DE LA COULEE

La coulée du métal consiste à verser le métal liquide dans l'installation de coulée, le traiter en cours de coulée et le solidifier sous différentes formes tels que plaques, billettes, lingots, fils ou bandes.

Trois ouvriers ont été brûlés, au démarrage d'une coulée de plaques, par une explosion provoquée par un déversement de métal dans l'eau. Ce déversement a été consécutif à un accrochage de plaques dans les lingotières.

Six personnes ont été mortellement blessées par une explosion d'aluminium ayant dévasté une installation de coulée continue verticale. Des surfaces horizontales dans le puits de coulée, ayant retenu de l'eau, semblent être à l'origine de cette explosion qui se produisit lors d'un déversement de métal en fusion.

Juste avant la fin d'une coulée de plaques, quatre personnes ont été tuées et vingt cinq gravement blessées par une explosion majeure survenue par une explosion survenue pendant un orage au moment où un coup de foudre frappait le hall de fonderie.

3.3 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES ACCIDENTS AUTRES QUE CEUX DUS A UN CONTACT INTEMPESTIF ALUMINIUM LIQUIDE – EAU

Nous présentons une sélection de quelques cas concrets d'accidents ou d'incidents autres que ceux dus à des projections explosives d'aluminium dues à un contact métal en fusion – eau.

3.3.1 LORS DE LA PREPARATION DES CHARGES

Des éboutages de plaques ont été empilés sur une palette qui s'est rompue pendant la manœuvre. Un opérateur a été blessé au pied.

Au cours d'une manutention de métal liquide avec une poche de 2,5 tonnes équipée d'un bras basculeur manuel, celui-ci s'est désolidarisé du palonnier de suspension, la poche a tourné librement autour de l'axe, le déversement du métal a brûlé l'opérateur.

Lors d'une collision entre un engin remorquant une poche de métal liquide et un chariot automoteur, le choc a provoqué le déversement du métal liquide hors de la poche, ce qui a entraîné l'incendie de la remorque (il n'y a eu que des effets thermiques, pas d'explosion).

3.3.2 LORS DE L'ELABORATION

Un accident a eu lieu dans une usine de recyclage, tuant un employé et brûlant grièvement deux autres, lors du chargement d'un paquet de déchets contenant du nitrate d'ammonium.

Un opérateur introduisait une bobine de fil dans un four à l'aide d'un chariot à fourches. En glissant, la bobine a projeté du métal liquide dans l'allée de circulation. Un conducteur d'un chariot porte-racle qui évoluait dans cette allée a été gravement brûlé.

Un écoulement de métal a provoqué un court circuit et le basculement involontaire du four, ce qui a entraîné la vidange de celui-ci au sol et la destruction du système hydraulique (immobilisation de l'installation pendant 15 jours).

Une surchauffe liée à l'oubli de remise en place du thermocouple de voûte après la révision annuelle a provoqué une destruction de la voûte du four de cuisson.

Un violent incendie s'est développé dans une fosse de rétention commune à trois fours, après perçage de l'un d'eux et fuite de métal liquide. Les organes de manœuvre (vérins) ont été détruits et, dans chacun des trois fours, dix tonnes de métal se retrouvèrent prises en masse.

Un opérateur a été brûlé par la projection de métal causée par l'introduction dans du métal liquide d'un racle recouvert de chlorure de magnésium provenant d'un décrassage précédent.

Lors d'un écrémage, en dégageant un engin en marche arrière, l'extrémité du racle a heurté le conducteur du chariot à fourches qui, descendu de son engin, attendait pour enlever les bols ; conséquences : contusions et brûlures.

Des opérateurs ont été brûlés par l'émission de gaz de combustion hors des portes, suite à l'accumulation de gaz dans le four et au ré-allumage brutal de celui-ci.

3.3.3 LORS DE LA COULEE

Deux accidents similaires ont eu lieu avec des conséquences identiques (écrasement et brûlures) :

- l'opérateur est intervenu dans la zone de chargement pendant le cycle automatique d'une louche alimentant une presse à injecter les métaux sous pression ; il s'est ainsi trouvé dans la trajectoire de la louche transportant le métal ; après avoir été percuté, il a été coincé entre la louche et le bâti de la machine ;
- lors d'une opération de démoulage de plaque (mouvement vertical), un déplacement horizontal involontaire a provoqué le heurt des plaques voisines entraînant leur basculement dans la fosse ; conséquence : dégâts matériels.

3.3.4 CONCLUSION

Les cas d'explosions d'aluminium en fusion en contact avec de l'eau génère des énergies variables selon le type de procédé traité. Les effets peuvent être de nature thermique (cas majoritaire) avec quelquefois des effets d'explosion.

3.4 BILAN DES SCENARIOS D'ACCIDENTS

Du retour d'expérience et de la littérature disponible sur ce thème de projections explosives de métal liquide, les principaux scénarios d'accidents relatifs au contact de métal en fusion avec de l'eau sont les suivants :

- ◆ La présence d'un corps creux contenant du liquide (canette, briquet, etc...) dans la charge de métal à introduire dans le four,
- ◆ De l'eau présente dans la charge comme dans le cas d'une charge stockée à l'extérieur et qui prend la pluie,
- ◆ La mise en four de magnésium déclassé,
- ◆ La pollution des matières premières due à un déchargement extérieur ou la présence d'agents étrangers (nitrates, sulfates, ...),
- ◆ La dilution du métal liquide,
- ◆ La percée du réfractaire ou du circuit de refroidissement,
- ◆ L'introduction d'eau dans les chenaux de coulée humides,
- ◆ Un sow non étuvé présentant donc des traces d'humidité.

Le risque de projection explosive de métal liquide, particulier aux opérations effectuées dans les fonderies, constitue le risque principal lié aux opérations de coulée. Il peut être dû à des anomalies de fonctionnement ou à des défaillances de matériel.

D'une façon générale, ce risque apparaît à l'occasion d'incidents de solidification mettant en jeu des écoulements involontaires et non contrôlés de métal liquide. Le refroidissement du métal liquide dans une lingotière de coulée semi-continue verticale est un processus complexe. Les zones de refroidissement et de déversement ou « percée » peuvent éventuellement se produire en cas d'incident de coulée.

Les incidents de solidification peuvent être les suivants :

- refroidissement irrégulier et insuffisant de la lingotière entraînant des percées de métal par refusion locale de produits préalablement solidifiés ;
- libération du métal liquide lors du déchirement d'une partie solidifiée suite à des tensions internes excessives ;
- vitesse de descente trop rapide entraînant des percées de métal par déchirement de la croûte solidifiée ;
- arrêt du descenseur pouvant entraîner des débordements de métal par surverse au-dessus de la lingotière ;
- accrochage ou coincement du produit solidifié en cours de coulée conduisant, lors du décrochage ou du décoincement, à des déversements de métal liquide dans la fosse de coulée.

Pour éviter le risque de contact entre l'eau et le métal liquide, plusieurs solutions techniques, issues des bonnes pratiques de la profession, ont été mises en place :

- Le séchage systématique de tous les bacs, et ce de façon continue à l'aide de brûleurs. Cela permet d'éviter l'accumulation d'humidité dans les bacs.
- Le poteyage des outils (au noir de fumée) afin d'éviter le contact entre de l'humidité qui aurait pu se former sur les outils (louches et barres à mine) et le métal liquide.
- Un poteyage blanc (à l'aide de talcs) dans les goulottes afin de lisser la surface de transfert du métal liquide, diminuer le risque d'humidité et augmenter la durée de vie des goulottes.
- A chaque fin de chantier, des morceaux de bois sont automatiquement placés dans les goulottes afin de pouvoir mettre en chauffe les goulottes avant le démarrage du prochain chantier, supprimant ainsi l'humidité formée au sein des goulottes entre les deux chantiers,
- Vérifier en amont du four de fusion toute marchandise pouvant contenir de l'humidité.
- Organiser une maintenance régulière des tubulures d'eau dans le four de fusion.

4. PHENOMENOLOGIE MISE EN CAUSE DANS UN CONTACT EAU/METAL EN FUSION

4.1 MECANISME ET CONDITIONS D'APPARITION D'EXPLOSIONS DUES A UN CONTACT INTEMPESTIF METAL LIQUIDE - EAU

Une première série de recherches^{1, 2, 3, 4} a permis de montrer que les métaux et alliages de métaux à l'état liquide étaient plus ou moins susceptibles d'engendrer des explosions au contact de l'eau dans certaines conditions, qu'ils soient ou non facilement oxydables. Il a été également mis en évidence que la probabilité de désintégration des gouttes de métal liquide est fonction :

- de la température initiale du métal,
- de la température initiale de l'eau,
- du flux de chaleur échangé entre le métal et l'eau, lequel dépend des conditions de vaporisation de l'eau autour des gouttes de métal.

Une recherche plus récente⁵ a permis de mieux comprendre les conditions dans lesquelles des explosions peuvent être amorcées lors des contacts simultanés entre le métal liquide, l'eau et les parois de l'installation. Elle a montré que :

- des explosions peuvent se produire aussi bien avec de l'aluminium (facilement oxydable) qu'avec du cuivre (moins facilement oxydable) et qu'il s'agit donc d'un phénomène plus physique que chimique,
- des revêtements de surface appropriés (à base de peintures bitumineuses ou de résines époxydiques) rendaient l'explosion du métal liquide très peu probable. Ces revêtements, qui ont une action locale sur la tension superficielle de l'eau, empêcheraient l'inclusion de molécules d'eau entre les parois et le métal liquide, répartissant ainsi la vaporisation de l'eau sur toute la surface de contact ce qui évite les projections explosives.

Ces données ont été confirmées par d'autres recherches plus empiriques^{6, 7, 8} ayant porté sur l'analyse de 1 400 explosions expérimentales (dans des conditions proches des conditions industrielles) qui ont montré que :

- les déversements d'aluminium liquide dans l'eau contenue dans des récipients d'acier ou de béton provoquent dans certaines conditions de violentes explosions : l'aluminium liquide peut exploser au contact de l'eau, notamment lorsqu'une paroi humide n'a pas été traitée correctement,
- la probabilité et la violence de l'explosion sont des fonctions croissantes de la section d'écoulement et de la température du métal. Elles sont également fonction de la quantité et de la température du métal liquide qui atteint le fond des récipients. Elles dépendent donc des distances parcourues par le métal déversé dans l'air puis dans l'eau de refroidissement. En particulier, dans les conditions d'essais, si cette hauteur d'eau est :

- de l'ordre de 50 mm, des projections se produisent (pas d'explosion),
 - comprise entre 75 et 150 mm, les récipients sont détruits par la force de l'explosion,
 - comprise entre 175 et 500 mm, des explosions ou des projections se produisent parfois,
 - supérieure à 500 mm, aucune explosion n'est observée.
- la violence de l'explosion est fonction de la nature du revêtement protégeant les parois des installations : le calcaire, le plâtre, la rouille, l'hydroxyde d'aluminium, la chaux vive augmentent la violence de l'explosion, alors que les peintures bitumineuses ou les résines époxydiques chargées de brai empêchent les explosions de se produire,
 - dans le cas où les revêtements des parois sont appropriés et le parcours du métal dans l'air puis dans l'eau sont suffisants, les températures maximales, enregistrées par thermocouple au contact des récipients, restent inférieures de 200°C environ à celles du métal déversé : aucune projection explosive n'est alors observée.

Outre ces études sur le phénomène lui-même, des essais relatifs au comportement de l'aluminium et de ses alliages ont permis de mieux connaître leur capacité à provoquer des projections explosives. L'organisation internationale « The Aluminium Association » (association regroupant les principaux producteurs d'aluminium nord – américains) a proposé à ses adhérents d'utiliser à des fins statistiques un classement des explosions en trois groupes , définis d'après les sensations éprouvées par le personnel, par ordre croissant de gravité.

Le **1^{er} groupe** se caractérise par des projections de métal liquide d'une portée de 3 à 5 mètres, sans rupture du récipient d'essai. Dans ce cas, les températures maximales de paroi observées sont du même ordre que celles du métal déversé : les projections ne sont dues qu'à la vaporisation rapide de l'eau.

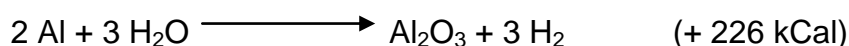
Le **2^{ème} groupe** est défini par des explosions violentes capables de projeter les débris du récipient d'essai à plus de 100 mètres de l'aire de l'essai. Dans ce cas, les parois des récipients peuvent atteindre, juste avant leur rupture, un niveau de température excédant de 200°C celui du métal déversé ; **ceci est l'indice qu'un début de réaction chimique complexe entre le métal, l'eau et la paroi du récipient s'est produit ajoutant ses calories à celles cédées par le métal dans le bilan énergétique de l'explosion.**

Le **3^{ème} groupe** contient les explosions catastrophiques pouvant détruire non seulement le récipient d'essai mais aussi le remblai de protection. Celles-ci s'accompagnent de projections de particules d'alumine incandescentes embrasant le voisinage de l'aire d'essai dans un rayon de 20 mètres. Dans ce cas, les températures de paroi des récipients d'essai peuvent excéder 1 500°C, un éclair d'explosion se produit et une grande quantité d'oxyde d'aluminium se dépose sur l'aire d'essai.

Ces phénomènes sont le résultat d'une réaction chimique très exothermique entre l'aluminium et des composés oxygénés tels que l'oxyde de fer ou la chaux (qui peuvent être présents dans les installations), éventuellement suivie par la combustion explosive d'hydrogène naissant (provenant de l'action de l'aluminium sur l'eau) dans l'oxygène de l'air.

D'une manière générale, l'eau et l'humidité constituent un risque pour les métaux pulvérulents.

Certaines poussières (Al, Mg, etc...) fixent facilement les molécules d'eau, entraînant une réaction chimique, avec pour effet un dégagement d'hydrogène :



Les réactions avec l'eau étant exothermiques, l'élévation de température peut être suffisante dans certaines conditions pour enflammer le mélange air / H₂.

Le tableau 1 suivant présente la classification des explosions d'aluminium :

Phénomènes constatés ou décrits par les témoins	1 ^{er} Groupe	2 nd groupe	3 ^{ème} Groupe
Lumière	Faible	Petit éclair	Eclair intense
Bruit	Crépitements	Bruit intense	Bruit insupportable
Vibrations	Petits frémissements	Vibrations moyennes localisées à une installation	Vibrations intenses, généralisées susceptibles d'atteindre les bâtiments
Projections de métal	Portée inférieure à 5 m	Portée comprise entre 5 m et 15 m	Portée supérieure à 15 m
Dégâts matériels	Aucun	Faibles	Considérables

Tableau 1 : Classification des explosions d'aluminium

4.2 APPROCHE THERMODYNAMIQUE DES PROJECTIONS EXPLOSIVES

Le phénomène énergétique résulte du transfert de chaleur entre le métal en fusion et l'eau et d'une vaporisation brutale de l'eau. Ce changement de phase conduit à une augmentation importante du volume de la phase gazeuse qui entraîne une projection du métal liquide.

Le mécanisme physique des explosions est explicité à partir d'un exemple : celui du chargement d'un bol humide dans un pied de bain de métal liquide.

Le bol humide, stocké à l'extérieur par exemple, retient en son cœur de l'humidité symbolisée par une goutte d'eau de la taille d'une bille.

Le bol est immergé dans le pied de bain. Instantanément, la fissure par laquelle s'est introduite l'humidité est bouchée par de l'aluminium. L'eau va s'échauffer et se transformer en vapeur. A l'air libre, cette transformation liquide/vapeur se ferait avec une augmentation de volume d'un facteur 1 700. Dans cet exemple, le nuage de vapeur ne peut s'expanser. La pression à l'intérieur de la cavité va augmenter et chercher à vaincre la résistance mécanique du bol. Les forces de pression demeurent toujours les mêmes, mais le bol s'échauffe et sa résistance mécanique diminue. Il va bientôt céder sous la pression. Le dégagement violent de la vapeur produit une explosion pouvant tuer, blesser ou brûler un opérateur et détruire la voûte du four.

L'énergie interne mise en œuvre au cours de la vaporisation brutale de l'eau en contact avec le métal en fusion peut se déterminer selon les lois de la thermodynamique, en prenant en compte l'hypothèse selon laquelle la projection du métal en fusion résulte d'une détente adiabatique de la vapeur d'eau assimilée à un gaz parfait.

Les explosions violentes ayant lieu lors d'un contact eau/métal en fusion sont le résultat d'un mécanisme physique durant lequel l'eau liquide va se transformer en vapeur dans un espace confiné. Elles peuvent causer des dégâts humains et matériels très importants comme le montre l'accident qui a eu lieu à Gandrange le 18 novembre 2004 où 7 employés ont été brûlés et deux bâtiments ont été soufflés à cause d'une explosion de métal liquide.

Par exemple, lors de l'introduction de métal liquide dans un creuset humide, l'eau va s'échauffer et se transformer en vapeur en dessous du métal liquide. A l'air libre, 1 litre d'eau peut créer 1,7 m³ de vapeur. Dans certains cas, le nuage de vapeur ne pouvant se développer, la pression sur le creuset va augmenter et générer sa rupture de façon violente avec projection de métal fondu et de morceaux de creuset.

Afin de déterminer l'énergie libérée par l'explosion, permettant ainsi de caractériser la gravité de l'accident et son origine, la méthode présentée ci-dessous peut être utilisée.

Cette méthode consiste à calculer l'énergie libérée à partir du principe de conservation de l'énergie lors d'une détente quasi-statique adiabatique.

A l'échelle macroscopique, les états d'équilibre d'un système idéal sont totalement définis par la donnée des variables d'état, soit le volume (V), le nombre de moles (N) des différents constituants du système (il s'agit ici de l'eau), la pression (P) et la température (T) du système.

Le premier principe de la conservation de l'énergie indique qu'il existe une variable d'état extensive appelée « Energie interne (U) » de ce système qui est égale à son énergie totale et qui, associée au volume V et aux nombres de moles des constituants du système, permet de définir tout état d'équilibre macroscopique accessible à ce système idéal.

Si au cours d'un processus, le système idéal échange une quantité de travail dW et une quantité de chaleur dQ avec le milieu extérieur, son énergie interne varie selon :

$$dU = dW + dQ \quad (1)$$

Dans le cas où le système n'échange pas de chaleur avec le milieu extérieur, on a $dQ=0$ et donc $dU = dW$.

Le travail des forces de pression dW qui a entraîné la projection du métal liquide est égal à la variation de l'énergie interne dU correspondant à l'augmentation de la température de la masse d'eau considérée.

On a :

$$dU = C_v.dT \text{ avec } C_v = \frac{1}{\gamma-1} NR \quad (2)$$

$$d'où \quad dU = \frac{1}{\gamma-1} NR.dT \quad (3)$$

avec

dU : variation de l'énergie interne du système (J),

γ : constante telle $\gamma = 9/7$ pour un gaz parfait polyatomique dont les molécules sont non linéaires (comme la vapeur d'eau,...). Cette constante intègre les trois composantes de l'énergie cinétique d'une molécule polyatomique (translation, rotation, vibration),

N : nombre de moles d'eau,

R : constante molaire d'un gaz parfait ($8,31441 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$),

dT : variation de la température (K) du système.

En appliquant la formule (3), l'énergie interne libérée par la quantité d'eau peut être calculée, en considérant que la température initiale de l'eau est de 15°C et sa température finale égale à celle du métal liquide mis en jeu. Le nombre de moles d'eau est calculé à partir du volume d'eau mis en jeu dans la réaction.

L'équivalent TNT peut ensuite être déterminé, en tenant compte du fait que la décomposition de 1 kg de TNT libère 4 690 kJ.

On obtient ainsi une donnée exploitable pour analyser le sinistre et ses conséquences.

Par exemple, dans le cadre d'une expertise d'accident, l'INERIS a évalué l'équivalent TNT d'un phénomène explosif qui s'est produit dans une poche d'aluminium liquide, selon trois scénarios consistant à admettre l'hypothèse d'une introduction de quantités variables d'eau dans la poche d'aluminium liquide.

Scénario 1 : il correspondait à l'introduction dans le métal de 5 ml d'eau en raison de la condensation naturelle ;

Scénario 2 : Il correspondait à la chute d'une des pales de l'écrêmoir au fond de la poche de coulée et à l'introduction de 46 ml d'eau dans le métal ;

Scénario 3 : il correspondait à un outil plongeant dans la poche de coulée immédiatement après poteyage et à l'introduction de 150 ml d'eau dans le métal.

La variation de l'énergie interne mise en œuvre au cours de la vaporisation brutale de cette eau en contact avec l'aluminium à 850°C a été calculée d'après les lois de la thermodynamique.

Au total, les équivalents TNT réels du phénomène explosif selon les scénarios n°1, n°2, n°3 sont respectivement au plus égal à 1,4 g, 13,2 g et 43,1g.

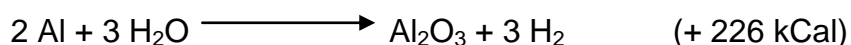
Le tableau 2 suivant présente les équivalents TNT du phénomène selon les scénarios n°1, n°2, n°3.

Scénario	Equivalent TNT
N°1	1,4 g
N°2	13,2 g
N°3	43,1 g

Tableau 2 : Equivalents TNT du phénomène selon les scénarios n°1, n°2, n°3.

En se reportant au tableau 1 relatif à la classification des explosions d'aluminium, les scénarios n°1, n°2 s'apparente au premier groupe et le scénario n°3 au second groupe.

Ces trois scénarios d'équivalent TNT d'une explosion physique de vapeur d'eau ne recouvre pas les cas d'explosions beaucoup plus violentes (cas des explosions du 3^{ème} groupe) mettant en jeu des réactions d'oxydoréduction. Pour ce troisième groupe, les équivalents TNT peuvent être déduits de l'équivalent TNT par gramme d'hydrogène généré selon la réaction suivante :



1 kg d'hydrogène peut libérer 120 000 kJ (pour rappel 1 kg TNT libère 4 690 kJ). Les scénarios du 3^{ème} groupe sont donc particulièrement énergétiques leur procurant un caractère catastrophique.

Les réactions avec l'eau étant exothermiques, l'élévation de température peut être suffisante dans certaines conditions pour enflammer le mélange air / H₂.

5. INVENTAIRE DES GUIDES DE BONNES PRATIQUES PUBLIÉS POUR LA PREVENTION DES ACCIDENTS METTANT EN ŒUVRE UN CONTACT EAU/MÉTAL EN FUSION

Un inventaire des guides de bonnes pratiques publiés est présenté dans ce chapitre.

5.1 PROJECTIONS EXPLOSIVES DE MÉTAL LIQUIDE DANS LES FONDERIES D'ALUMINIUM, CAUSES ET PREVENTIONS (INRS)

L'INRS publie depuis plusieurs années des guides de prévention sous forme de notes documentaires dans plusieurs domaines de l'industrie. L'un d'entre eux, publié à la fin des années 80, traite du problème des projections explosives de métal liquide liées à un contact eau/métal en fusion. Ce document est référencé ND 1567 (« Projections explosives de métal liquide dans les fonderies d'aluminium. Causes et prévention ») et son contenu est présenté en annexe 2.

Cette note documentaire couvre les thèmes suivants :

- ☞ Le retour d'expérience en citant quelques cas d'accidents mettant en jeu un contact eau/métal en fusion. Les accidents sont dus à des défauts de conception des fours de fusion et à la négligence humaine. Les dégâts humains et matériels occasionnés et les mesures prises afin d'éviter un nouvel accident sont précisés.
- ☞ Un bilan documentaire sur les études ayant été effectuées dans le domaine des projections de métal explosives et les causes de ces explosions. Deux études sont particulièrement mises en avant :
 - Explosions of Molten Aluminium in Water – Causes and Prevention by G. LONG est une étude américaine datant de 1957⁶ mettant en avant les facteurs pouvant déclencher, accentuer ou encore atténuer l'effet d'une explosion de métal liquide en présence d'eau. Les résultats ont été tirés d'une série d'expériences dans lesquelles du métal fondu est introduit dans un creuset contenant de l'eau. Certains facteurs varient en fonction par exemple comme la hauteur de coulée du métal ou de la nature du creuset (dépôt d'une couche d'asphalte à l'intérieur du creuset)
 - Molten Aluminium – Water Explosions and Their Prevention By Paul D.HESS and Kenneth J.BRONDYKE est une étude similaire à la précédente publiée en 1969. Après plusieurs séries de tests effectuées également en versant du métal liquide dans un creuset contenant de l'eau, les chercheurs ont déterminé que la hauteur d'eau contenue dans la fosse de coulée devait être maintenue à sa valeur maximale et que des traitements de surface devaient être effectués sur certains équipements de la coulée.

- ☞ La description générale d'une installation de coulée semi-continue verticale
- ☞ La mise en place de principes de sécurité et de solutions techniques lors de la conception ou de la révision d'une installation de coulée.
- ☞ Une série de recommandations sur la sécurité du four de fusion est proposée comme la perforation des bennes de chargement des fours afin d'éliminer l'eau contenue dans ces bennes.

Des conseils concernant toutes les parties du poste de coulée semi-continue verticale sont proposés en s'attardant en particulier sur les équipements de coulée, le circuit de refroidissement et la fosse de coulée.

- ☞ La mise en place de mesures préventives applicables sur les sites en exploitation telles que :
 - Des considérations techniques à respecter,
 - Des procédures à respecter,
 - Une formation et une sensibilisation continue du personnel.

Il faut toutefois noter que toutes les informations de cette note documentaire sont générales. Les solutions techniques sont données à titre de conseil et leur conception n'est pas détaillée.

5.2 RECUEIL DE DIRECTIVES PRATIQUES SUR LA SECURITE ET LA SANTE DANS L'INDUSTRIE DU FER ET DE L'ACIER

Ce recueil, présenté par l'Organisation Internationale du Travail (OIT, 2005), propose une approche différente de celle de la note documentaire ND 1567 publiée par l'INRS concernant la prévention des explosions de poche de métal en fusion.

Un extrait de ce recueil est présenté en annexe 3.

En effet, ce guide concerne tous les risques possibles que l'on peut rencontrer dans l'industrie du fer et de l'acier. Il ne se spécialise pas uniquement dans le problème des explosions de métal liquide lié à un contact eau/métal en fusion. Nous nous attarderons donc uniquement sur les parties ayant rapport avec l'accident qui fait le sujet de notre étude.

Le management organisationnel prédomine dans les premières parties de ce guide. Tous les acteurs jouant un rôle dans la vie de l'entreprise sont cités en tant que personne à sensibiliser face à la sécurité des employés, qu'ils soient directeur, employeur, employé, fournisseur ou encore intervenant extérieur.

Un point particulier est fait sur les déclarations d'accidents. En effet, un accident ne doit jamais rester sans suite et un plan d'action, basé sur le retour d'expérience, doit être mis en place. Un point est donc fait sur la législation en vigueur et les procédures à respecter.

La fin du guide concerne la sécurité sur les postes présents dans une entreprise fabriquant du fer et de l'acier. Le problème des projections de métal liquide est abordé notamment concernant les EPI :

« 7.2.1. Les incendies et les explosions se produisant dans les fours sont souvent dus à l'entrée en contact d'eau avec les métaux en fusion. L'eau peut être présente dans la mitraille ou dans les moules humides ou provenir de fuites dues soit à un vice de construction soit au système de refroidissement du four. »

La prévention des projections de métal en fusion en contact avec de l'eau est abordée dans un paragraphe entier. Les dangers liés à la manutention du métal en fusion sont décrits, tels que les brûlures qui peuvent être provoqués par le four au cours de la fusion du métal ou encore les projections de métal liquide qui peuvent survenir.

C'est à partir de ces dangers que l'évaluation des risques peut avoir lieu, et des mesures peuvent être prises. Les mesures concernent avant tout la sensibilisation du personnel et sa formation. Un point important est aussi fait sur la maintenance des installations composant le four. Aucune solution technique n'est proposée, hormis le port d'EPI (Équipement de Protection Individuelle).

5.3 BILAN DES CONTENUS DES INVENTAIRES DE BONNES PRATIQUES

Le guide de l'INRS aborde de façon plus précise l'accidentologie, la phénoménologie des projections explosives. Ce guide indique des recommandations techniques pour éviter de tels scénarios accidentels et permet l'analyse et la prévention des risques liés aux projections explosives.

Le recueil de directives pratiques sur la sécurité et la santé dans l'industrie du fer et de l'acier, qui est une révision du recueil adopté en 1981, est destiné à contribuer:

- a) à protéger les travailleurs de l'industrie du fer et de l'acier contre les risques présents sur le lieu de travail et à la prévention ou à la réduction des lésions et maladies liées au travail, des pathologies et des incidents,
- b) à faciliter et à renforcer la gestion des problèmes de sécurité et de santé au travail sur le lieu de travail,
- c) à promouvoir des consultations et une coopération efficaces entre les gouvernements et les organisations d'employeurs et de travailleurs en vue du renforcement de la protection de la santé et de la sécurité dans la production du fer et de l'acier,

d) faciliter la mise en place d'une politique et de principes nationaux cohérents sur la sécurité et la santé au travail et le bien-être des travailleurs dans les établissements métallurgiques et sur la protection du milieu de travail en général,

e) définir les devoirs et responsabilités respectifs des autorités, des employeurs, des travailleurs et autres, et organiser une coopération cohérente entre eux,

f) améliorer les connaissances et les compétences,

g) promouvoir la mise en oeuvre et l'intégration de systèmes cohérents de gestion de la sécurité et de la santé au travail en vue d'améliorer les conditions de travail.

6. BONNES PRATIQUES PROFESSIONNELLES INDUSTRIELLES

Afin de compléter les données recueillies lors de la recherche bibliographique et d'identifier quelles sont les pratiques industrielles par rapport à ces guides, des visites ont été effectuées sur deux sites.

6.1 AFFINERIE AFFIMET (GROUPE ALCAN) – COMPIEGNE (OISE)

Caractéristiques générales

AFFIMET est une affinerie implantée à Compiègne, dans une petite zone industrielle située à la périphérie de la ville. AFFIMET fait partie du groupe ALCAN (leader mondial de l'aluminium ayant racheté la société ex PECHINEY) et produit principalement des lingots d'aluminium et de l'aluminium liquide destinés à la livraison vers d'autres sites.

La société AFFIMET a été reprise par la société RECOVCO le 15 avril 2007. Elle s'appelle maintenant RECOVCO-AFFIMET. A ce jour l'activité « aluminium liquide » n'a pas été reconduite pour le moment.

Politique de sécurité

Après une visite du site et un entretien de l'INERIS avec le responsable sécurité et le responsable production, plusieurs informations concernant la sécurité par rapport au risque d'explosion de métal liquide sont ressorties :

- ☞ Un référentiel mondial sur les bonnes pratiques a été publié par le groupe ALCAN. Malgré sa généralité, ce référentiel constitue une base de sécurité commune pour toutes les entreprises du groupe ALCAN.
- ☞ L'eau est considérée comme le risque majeur de toutes les opérations qui s'effectuent au sein de l'affinerie selon le responsable sécurité du site AFFIMET.
- ☞ Pour éviter le risque de contact entre l'eau et le métal liquide, plusieurs solutions techniques ont été mises en place :
 - Le séchage systématique de tous les bacs, et ce de façon continue à l'aide de brûleurs. Cela permet d'éviter l'accumulation d'humidité dans les bacs,
 - Le poteyage et préchauffage des outils métalliques pour éviter le contact aluminium liquide avec l'humidité ou la rouille qui aurait pu se former sur les outils (louches et barres à mine).
 - Un poteyage blanc (à l'aide de talcs) dans les goulottes afin de lisser la surface de transfert du métal liquide, diminuer le risque d'humidité et augmenter la durée de vie des goulottes,

- Le préchauffage ou le maintien en chauffe des goulottes est réalisé soit par un feu de morceaux de bois, soit par une rampe de gaz ou soit par des propulseurs d'air chaud. Ceci est indispensable pour supprimer l'humidité dans les goulottes avant le démarrage du prochain chantier ou entre deux chantiers.
- ☞ Hormis les solutions techniques, l'encadrement est très impliqué au sein de l'affinerie depuis plusieurs années et tient compte du retour d'expérience.
- ☞ Des règles fondamentales sont écrites dans un livret de sécurité du site et appliquées à la lettre et des sanctions disciplinaires sont mises en place en cas de non-respect des règles.

Dans le contexte du système du progrès continu au sein du Groupe ALCAN, « la sécurité est une priorité absolue ». Il leur faut donc observer, détecter et corriger immédiatement les anomalies.

Diffusion de l'information

Un outil « les fondamentaux visibles », est donc mis en place pour les aider dans cette démarche.

Les fondamentaux visibles sont un ensemble de règles, toutes de bon sens, que chaque salarié doit connaître et appliquer :

La liste complète est diffusée sous le format d'un petit livret à chaque salarié qui doit en prendre connaissance.

Ce petit livret met l'accent sur 14 fondamentaux sur lesquels la politique Sécurité du Groupe est focalisée.

Le respect des règles de sécurité est une condition de l'emploi.

Ces fondamentaux sont indiqués dans une fiche que possède toute personne travaillant dans l'entreprise. Elle sensibilise sur la notion de sécurité avant d'énumérer les fondamentaux que doivent respecter chaque employé de l'affinerie :

- A) FONDAMENTAUX VISIBLES « COMPORTEMENT/METIER » :
ACCES/CIRCULATION ET RANGEMENT.**
- B) FONDAMENTAUX VISIBLES « COMPORTEMENT/METIER » :
ENGINS/PIETONS/CARISTES.**
- C) FONDAMENTAUX VISIBLES « COMPORTEMENT/METIER » : OPERATIONS
DE LEVAGE.**
- D) FONDAMENTAUX VISIBLES « COMPORTEMENT/METIER » : TRAVAUX EN
HAUTEUR.**
- E) FONDAMENTAUX VISIBLES « COMPORTEMENT/METIER » : FONDERIE.**

La partie concernant le risque d'accident lié à un contact eau/métal fusion est la partie fonderie.

Cette partie est constituée de 24 règles fondamentales à respecter, notamment les 8 principales suivantes :

- Port de la tenue en laine, Pyrovicel ou Vinex
- Port d'une tenue supplémentaire (aluminisée ou en VICOR) au démarrage des coulées (intégrant la protection de la tête),
- Port des lunettes de sécurité,
- Devant les fours, les piétons ne circulent pas dans la zone d'évolution des engins,
- Aucune personne n'est présente autour des fours pendant le chargement, le décrassage et le brassage,
- Toutes les bennes sont percées,
- Les bacs de vidange destinés à recevoir du métal liquide ne contiennent ni d'humidité, ni de rouille, ni traces de poudre d'extincteur,
- Les outils entrant en contact avec le métal liquide sont poteyés et préchauffés.

F) FONDAMENTAUX VISIBLES « COMPORTEMENT/METIER » : MAINTENANCE.

Mesures organisationnelles : application des « fondamentaux visibles » du livret de sécurité

Des exercices et contrôles sont organisés régulièrement. Chaque semaine, des visites hiérarchiques de sécurité et des tests de capacité à réagir sont mis en place sur le terrain.

Une multitude d'indicateurs ont été intégrés autour des postes de travail de l'entreprise pour sensibiliser continuellement les employés. Par exemple, le baromètre de situation dangereuse indique quotidiennement à partir de plusieurs facteurs la probabilité d'occurrence d'un accident, renforçant ainsi la vigilance des personnes présentes sur le site.

Deux films sur la sécurité sont diffusés aux nouveaux arrivants et une double présence est mise en place lors des premiers jours sur le poste. Ces deux films, s'appuyant sur le retour d'expérience de l'entreprise, présente les principaux scénarios possibles d'explosion liés à un contact eau/métal en fusion. Les scénarios présentent les éléments chargés d'humidité pouvant générer une grave explosion tels que :

- ◆ La présence d'un corps creux contenant du liquide (canette, briquet, ...) dans la charge de métal à introduire dans le four,

- ◆ La mise en four de magnésium déclassé,
- ◆ La pollution des matières premières due à un déchargement extérieur ou la présence d'agents étrangers (nitrates, sulfates, ...),
- ◆ La dilution du métal liquide,
- ◆ De l'eau présente dans la charge comme dans le cas d'une charge stockée à l'extérieur et qui prend la pluie,
- ◆ Un sow non étuvé présentant donc des traces d'humidité.

Afin d'éviter ces accidents et afin de renforcer la vigilance et la sensibilisation auprès des nouveaux embauchés, chaque situation est présentée, et des recommandations sont indiquées à chaque fin de situation comme un contrôle continu des matières premières à la réception et lors du chargement dans les fours.

6.2 ACIERIE DE L'ATLANTIQUE (ADA) – BOUCAU (PYRENEES-ATLANTIQUES)

Caractéristiques générales

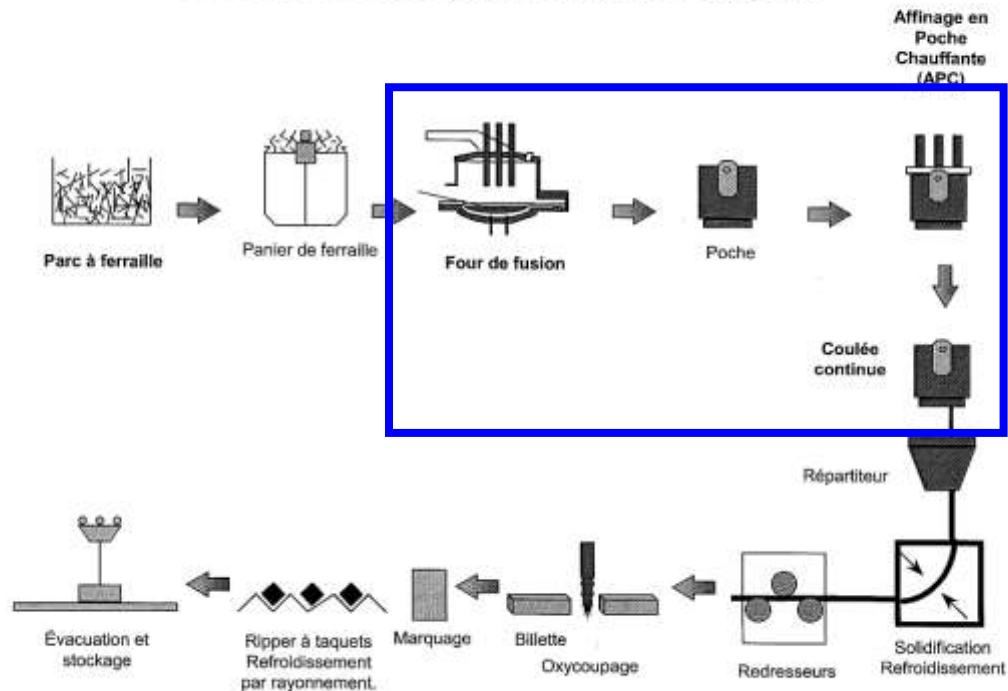
ADA est une aciérie spécialisée dans la fabrication de billettes en acier, employant 228 personnes et possédant un chiffre d'affaires de 268 millions d'euros en 2004. Elle est implantée dans la région industrielle de la ville de BOUCAU.

Elle fut créée en tant qu'entreprise familiale en 1995 avant d'être rachetée par ARCELOR en 2001. Puis, elle fut vendue au **groupe espagnol Añon** mi-2004.

Politique de sécurité

Afin de s'intéresser à la sécurité du site en matière d'explosion de métal liquide en contact avec de l'eau, nous présentons ci-après le procédé de fabrication des billettes en acier pour identifier les zones à risque.

Présentation Générale / Diagramme de Flux



La zone de danger lors du processus est représentée par le rectangle noir.

Les principales zones où il y a un risque d'explosion lié à un contact eau/métal en fusion sont le four de fusion refroidi continuellement par tubulures dans lesquelles de l'eau circule et la poche qui récupère le métal liquide sortant du four de fusion au moment de la coulée continue qui se fait dans des bombonnes de cuivre chauffées par eau. Une fosse de sécurité est également présente pour récupérer le métal liquide en cas de fuite. Cette fosse étant située à proximité de câbles électriques et de canalisations d'O₂ sous pression, des risques importants y demeurent.

Après entretien de l'INERIS avec la Responsable QSE et le Responsable production, plusieurs informations concernant la sécurité par rapport au risque d'explosion de métal liquide sont ressorties :

L'entreprise ADA prône la précaution par rapport au risque ainsi que la sensibilisation de son personnel.

Pour toutes les étapes de la fabrication, une identification, une évaluation et une hiérarchisation des risques ont été effectuées et des documents ont été élaborés.

Ces documents permettent d'évaluer sur chaque poste les dangers, leur probabilité d'occurrence, leur gravité, leur conformité par rapport aux exigences légales et autres et le niveau de maîtrise du risque par rapport à ces dangers.

Les documents sont présentés sous forme de tableaux et sont disponibles à tout moment sur le réseau informatique de l'entreprise ou par simple demande. L'un d'entre eux est disponible en annexe 3.

Leur mise à jour est régulière en fonction de nouvelles informations provenant du retour d'expérience et des évolutions dans le domaine du risque.

En plus du document concernant les risques, une fiche de poste sécurité production spécifique est installée sur chaque poste de la production. Elle rappelle les précautions à prendre au cours de la manipulation des produits. Et fait également un bilan des dangers présents à chaque étape de la manipulation. L'une d'entre elles est présentée en annexe 4.

Concernant le risque de contact entre l'eau et le métal en fusion, plusieurs précautions sont indiquées :

- ◆ Vérifier en amont du four de fusion toute marchandise pouvant contenir de l'humidité.
- ◆ Vérifier le grappin d'alimentation du four
- ◆ Au moment du chargement, éloigner tout le personnel se trouvant à proximité du four.
- ◆ Organiser une maintenance régulière sur les tubulures d'eau dans le four de fusion.

Des exercices de simulation sont organisés afin de prévenir toute situation critique. L'exercice de simulation de déclenchement du POI (Plan d'Organisation Interne) du 21 octobre 2005 dont le scénario était « Explosion au four suite au recouvrement d'une grande quantité d'eau et d'acier en fusion avec projection d'acier liquide a permis de déceler plusieurs failles concernant la sécurité du site qui ont été corrigées par la suite.

Afin d'éviter qu'un accident se renouvelle, une part importante est faite au retour d'expérience. Dès qu'un accident a eu lieu, une fiche descriptive incluant un compte-rendu de l'accident est automatiquement effectué et de nouvelles mesures sont proposées lors d'un groupe de travail d'analyse de l'accident avant de mettre en place un plan d'actions correctives constitué de mesures de prévention et de protection mises en place le plus rapidement possible après l'accident. L'une des ces fiches est présentée en annexe 4.

Pour éviter le risque de contact entre l'eau et le métal liquide en certains lieux, plusieurs solutions techniques ont été mises en place :

- dans le four, le laitier situé au fond est composé en partie de briques recouvertes de poudre réfractaire pour empêcher le laitier de chauffer le four,

- au niveau de la fosse de sécurité située en dessous de la poche, des scories chaudes sont placées à l'intérieur afin d'éviter tout dépôt d'humidité pouvant provoquer une explosion de métal liquide.

Gestion des bonnes pratiques professionnelles au sein de la sidérurgie

L'Association Technique de la sidérurgie (ATS) est constituée de groupes industriels (aciérie,) qui se réunissent régulièrement afin de rédiger des comptes-rendus de sécurité à partir du retour d'expérience d'incidents et d'accidents et du savoir-faire des industriels dans la maîtrise des accidents mettant en jeu des poches de métal au contact de l'eau.

7. CONCLUSION

La projection de métal fondu au contact de l'eau est un phénomène explosif bien connu dans le domaine de la métallurgie. Depuis, un travail sur la maîtrise de ce phénomène existe de façon conséquente au sein du milieu industriel.

L'objet de ce rapport a permis d'identifier les bonnes pratiques professionnelles au niveau national et mondial dans le secteur de la métallurgie et d'éclairer en terme de phénoménologie de tels phénomènes explosifs.

Certains guides de bonnes pratiques sont disponibles par simple recherche bibliographique et permettent d'obtenir un squelette représentant les bonnes démarches à suivre afin d'assurer une sécurité optimale dans les entreprises. Certains sont plus techniques que d'autres mais possèdent des outils utiles à la mise en place de la sécurité.

Au niveau national, le secteur de la sidérurgie a constitué une association Technique de la Sidérurgie qui se réunit régulièrement afin de rédiger des compte-rendus de sécurité à partir du retour d'expérience d'incidents et d'accidents et du savoir-faire des industriels dans la maîtrise des accidents mettant en jeu des poches de métal au contact de l'eau.

Une trentaine de cas ont été recensés sur la base de données ARIA gérée par le BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles). Ces accidents décrivent des explosions eau / métal en fusion survenues en France et à l'étranger).

Au cours des ces recherches, trois scénarios accidentels ont été identifiés :

- ☞ Introduction d'un corps humide dans le four,
- ☞ Percée du réfractaire ou du circuit de refroidissement,
- ☞ Chenaux de coulée humides.

Dans le cadre de cette étude nous avons rencontré deux industriels, dont l'un appartient au Groupe ALCAN (secteur de l'aluminium) et le second est une entreprise dans le secteur de l'acierie (Acierie de l'atlantique).

Pourtant, toutes les informations restent d'ordre général et les visites sur sites ont permis de déterminer que l'entreprise doit elle-même à partir de ces guides ou non assurer le maintien des règles de sécurité par des directives internes ou d'elles-même venant du groupe auquel elle appartient ou d'elle-même.

Pour l'industriel issu du Groupe ALCAN, le retour d'expérience interne et la démarche d'évaluation du risque est issue des règles de bonnes pratiques mondiales mais qui ont été tirées du retour d'expérience de l'ancienne société PECHINEY au niveau français.

Quelques solutions techniques sont appliquées, provenant généralement de guides de bonnes pratiques professionnelles mais le rôle de l'encadrement est prépondérant dans l'entreprise (avec toutefois un manque de mise en commun et de concertation entre entreprises). De façon préventive ou autoritaire, c'est lui qui maintient un niveau de sécurité des employés et des installations au sein des équipements de coulée du métal.

Même si une attention particulière existe bel et bien concernant les risques liés aux projections explosives de métal liquide, il est important de signaler, aujourd'hui, que de tels accidents surviennent encore, ce qui nécessite une vigilance accrue du management au niveau de gestion de la sécurité.

8. RÉFÉRENCES

Documents, études et recherches concernant les fonderies d'aluminium

- (1) Operational safety during vertical semi-continuous and continuous casting of aluminium. Londres, HMSO, Joint Standing Committee on Health, Safety and Welfare in Foundries, Sous – comité "Continuous casting and high speed melting", 1^{er} rapport, 1972.
- (2) Causes and prevention of break-out during vertical semi-continuous and continuous casting of aluminium alloys. Londres, HMSO, Joint Standing Committee on Health, Safety and Welfare in Foundries, Sous-comité "Continuous casting and high speed melting", 2^{ème} rapport 1976.
- (3) A warning and control system for continuous casting (as applied to copper alloys). Londres, HMSO, Joint Standing Committee on Health, Safety and Welfare in Foundries, Sous –comité "Continuous casting and high speed melting", 3^{ème} rapport 1976.
- (4) A study of the causes of molten metal and water explosions, Londres, HMSO, Joint Standing Committee on Health, Safety and Welfare in Foundries, Sous – comité "Continuous casting and high speed melting", 4^{ème} rapport, 1997.
- (5) NELSON LS., EATOUGH M.J., GUAY K. P., Why does molten aluminium explode at underwater or wet surfaces CAMPBELL P.G. (ed) – Light metals 1989. Metals Park (OH), The minerals, Metals and Materials Society, 1989, pp. 951-961.
- (6) LONG G. – Explosions of molten aluminium in water. Causes and prevention. Metal progress, Mai 1957.
- (7) HESS P.D., BRONDYKE K.J. – Molten aluminium. Water explosions and their prevention. Metal progress, avril 1969.
- (8) HIGGINS H.M., SCHULTZ R. D. – The reaction of metals with water and oxidizing gases at high temperatures. Azusa, Aerojet – General Corporation, 1957, IDO628000.

GRECO A., MACE R. – Aluminium explosion in the Issoire plant. Phenomena in TMS annual meeting, Phoenix, The Metallurgical Society, 1988.

HICTER J.M., RAMOND D. – Aluminium explosion in the Issoire plant. Evidence collected, in TMS annual meeting, Phoenix, The Metallurgical Society, 1988.

Guidelines for handling molten aluminium – 2^{ème} Ed. The Aluminium Association – Washington 1990.

Réf. : DRA-07-85166-17188A

WALLACH P. – Safety in Pechiney CRV's aluminium casthouse, in Light Metals, 1993, pp. 869-878.

Projections explosives de métal liquide dans les fonderies d'aluminium, causes et préventions

P. GROS, ingénieur INRS, 1^{er} trimestre 1986.

Fonderies d'aluminium. Analyse et prévention des risques liés aux fours.
Guide Pratique de Prévention GPP4. INRS, n°166, 1^{er} trimestre 1997.

Fonderies d'aluminium. Risques et prévention

J. TRIOLET, JP PETIT ingénieurs INRS, ED 830.

Recueil de directives pratiques sur la sécurité et la santé dans l'industrie du fer et de l'acier

Bureau international du travail de Genève

2005

Détermination de l'équivalent TNT d'un phénomène explosif de projection d'aluminium liquide

S. EVANNO, ingénieur INERIS

Mars 2002

Techniques de l'ingénieur M3 623 :Elaboration de l'acier moulé – Fours de fusion

Jean-Marcel MASSON

2002

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nb pages
1	Analyse du retour d'expérience concernant les explosions de métal en fusion (ARIA / BARPI)	7
2	Projections explosives de métal liquide dans les fonderies d'aluminium. Causes et prévention	13
3	Extrait du Recueil de directives pratiques sur la sécurité et la santé dans l'industrie du fer et de l'acier de l'OIT concernant la prévention des explosions de poche de métal en fusion	2
4	Données relatives à la gestion de la sécurité de l'entreprise Aciérie De l'Atlantique de Le Boucau : Compte rendu d'accident Fiche de poste production du four de fusion Identification, évaluation et hiérarchisation des risques liés au four	9

ANNEXE 1

**Analyse du retour d'expérience concernant les explosions de
métal en fusion**

**(Base de données ARIA du Bureau d'Analyse des Risques et des
Pollutions Industrielles)**

N° 12814 - 01/01/1981 - 25 - SOCHAUX

34.3 - Fabrication d'équipements automobiles

Lors d'une percée sur un four en fusion, une explosion se produit à la suite de la mise en contact entre la fonte et l'eau de refroidissement du four. Une personne décède suite à des brûlures par de la fonte projetée et des dégâts matériels importants sont observés sur les fours. (La date et le mois de l'accident sont inconnus).

N° 104 - 15/01/1989 - JAPON - SAKAI / OSAKA-FU

27.1 - Sidérurgie

Suite à une mauvaise soudure réalisée 15 ans auparavant, des fissures entraînent la rupture brutale du réservoir d'eau d'un gazomètre de 35 000 m³, et le rejet de 15 000 m³ d'eau et 25 000 m³ de gaz à 70 % de CO. Le nuage de CO s'enflamme immédiatement. La nappe d'eau renverse un wagon de métal en fusion (torpedo-car) en attente, générant une explosion de vapeurs. Les projections de métal propagent l'incendie à 3 autres bâtiments sur le site. L'incendie est maîtrisé en 3 h avec 17 véhicules. Un blessé est à déplorer.

N° 95 - 17/06/1989 - ITALIE - SESTO SAN GIOVANNI / MILANO

27.3 - Autres opérations de première transformation de l'acier

Dans une unité sidérurgique, une fuite sur une canalisation d'eau de refroidissement entraîne l'explosion d'une poche de métal en fusion. L'explosion fait 1 mort et 6 blessés graves (aucune autre précision disponible).

N° 3512 - 01/04/1992 - 14 - MONDEVILLE

27.1 - Sidérurgie

Dans une aciérie, une lance à oxygène est coincée dans un convertisseur de fonte de 120 t à la suite de la formation d'un amalgame (loup). Les tentatives de déblocage sont inefficaces. Une découpe au chalumeau permet de dégager la partie supérieure de la lance mais lors de la découpe de l'amalgame le circuit de refroidissement est percé. De l'eau entre en contact avec le métal en fusion et provoque une explosion qui projette 2 employés : 1 mort et 1 blessé sont à déplorer. L'installation endommagée est inutilisable durant plusieurs semaines alors que le second convertisseur du site est en cours de maintenance. Une réduction d'activité est probable. Les dommages matériels et les pertes d'exploitation sont respectivement évalués à 4 et 5 MF.

N° 3924 - 09/09/1992 - 33 - MERIGNAC

27.5 - Fonderie

Une fausse manœuvre d'un opérateur provoque une explosion due à une vaporisation instantanée d'eau de trempe à la suite d'une coulée massive de cuivre en fusion. La cuve de trempe et la toiture sont détruits. Un ouvrier est blessé et le four est arrêté.

N° 4876 - 02/12/1993 - 78 - GARGENVILLE

27.3 - Autres opérations de première transformation de l'acier

Dans une aciérie, une explosion se produit dans un four électrique à la suite d'une fuite d'eau dans un circuit de refroidissement. Le souffle de l'explosion arrache des bardages métalliques et brise des vitres. Neuf blessés légers sont à déplorer et des équipements du four sont endommagés ; 50 pompiers sont intervenus.

N° 5663 - 27/07/1994 - 03 - COMMENTRY

27.1 - Sidérurgie

Dans une aciérie, une explosion détruit un four électrique contenant 28 t d'acier en fusion. De faibles projections de métal provoquent un début d'incendie maîtrisé par 20 pompiers mobilisés pendant une demi-journée. 10 employés inhalent de la poussière et sont hospitalisés pendant quelques heures pour soins et observation. Des éléments de briquetage sont projetés à 50-100 m. Certains perforent 2 cloisons. Les dégâts matériels très importants entraînent 4 semaines de chômage technique. L'explosion a pour origine une anomalie sur le niveau d'acier en fusion conduisant à la mise en contact du métal et de l'eau circulant dans l'échangeur thermique annulaire de refroidissement d'une porte (bouillotte).

N° 13182 - 05/09/1994 - ALLEMAGNE - MEITLINGEN

27.3 - Autres opérations de première transformation de l'acier

Dans une fonderie, une explosion provoque la mort de 7 personnes. Après une réparation du revêtement réfractaire (garnissage de four) d'un four à arc électrique, une fumée grisâtre s'échappe lors de la fusion de la dernière charge de ferraille à la suite de l'introduction d'oxygène pour activer la fusion. L'explosion se produit pendant l'arrêt de l'alimentation en énergie et le relevage des électrodes de fusion, ainsi que du couvercle du four à fusion pour contrôle. La formation d'un arc électrique entre l'électrode et le circuit de refroidissement provoque un trou et de l'eau s'écoule dans la zone de fusion, ce qui entraîne une explosion de vapeur.

N° 8045 - 30/09/1994 - 55 - STENAY

27.5 - Fonderie

Un four électrique à induction d'une capacité de 1 t explose, vraisemblablement à la suite du perçage du circuit de refroidissement et à la projection d'eau dans l'acier en fusion. Il n'y a pas de conséquence humaine. Un organisme tiers effectue une enquête et relève des défaillances organisationnelles et humaines.

N° 12875 - 01/01/1995 - 08 - CHARLEVILLE-MEZIERES

34.1 - Construction de véhicules automobiles

Au cours d'une opération de maintenance sur un four affleurant, un opérateur renverse une brouette contenant une charge humide dans un bain de fusion. Des projections enflammées brûlent 2 personnes grièvement. (La date et le mois de l'accident sont inconnus).

N° 6390 - 01/02/1995 - 33 - PESSAC

28.7 - Fabrication d'autres ouvrages en métaux

Une violente réaction se produit entre du métal en fusion et de l'eau après un contact accidentel au niveau d'une lingotière en sortie de four de fusion. Le mélange métal / vapeur est projeté. Cinq ouvriers se trouvant à proximité sont brûlés, principalement aux membres supérieurs et à la tête, et sont hospitalisés. L'activité de fonderie est arrêtée, et une expertise judiciaire est demandée. La production de pièces n'est pas directement affectée par le sinistre. Les dégâts matériels sont évalués à 2 MF.

N° 8044 - 17/10/1995 - 55 - STENAY

27.5 - Fonderie

Un four électrique à induction d'une capacité de 1 t explose dans une fonderie d'acier. Aucune victime n'est à déplorer. La perte de production est estimée à 400 kF par semaine d'immobilisation. Une projection d'eau dans le métal en fusion à la suite d'une forte usure du réfractaire (pourtant vérifié quelques heures auparavant) et du perçage par fusion des tubes de refroidissement en cuivre sont à l'origine de l'accident. Un organisme tiers effectue une enquête.

N° 12003 - 01/12/1997 - 988 - DONIAMBO

13.2 - Extraction de minerais de métaux non ferreux

Une explosion survient sur l'un des quatre fours de l'usine de nickel. Elle résulte d'un élargissement de l'ouverture supérieure normalement destinée à l'évacuation des scories. Le métal fondu y a pénétré et a réagi violemment avec l'eau utilisée pour refroidir les scories. L'ouverture s'est agrandie et les scories se sont répandues dans l'atelier. Les pompiers ont créé un bouchon de scories en les refroidissant avec un puissant jet d'eau. Un ouvrier est légèrement blessé. Cet incident aurait eu des antécédents.

N° 16401 - 19/07/1999 - ETATS-UNIS - DEARBORN

34.1 - Construction de véhicules automobiles

Une explosion suivie d'un incendie se produit au niveau du haut-fourneau du complexe de ROUGE blessant légèrement un employé. L'accident s'est produit au moment où des scories chaudes en provenance du haut-fourneau sont versées dans une fosse. Des eaux de pluie sont entrées en contact avec de l'acier chaud provoquant une petite explosion. Celle-ci a projeté des scories en fusion sur un bâtiment de maintenance connexe, qui s'est enflammé. Les dégâts matériels sont mineurs.

N° 17205 - 15/12/1999 - 57 - GROSBLIEDERSTROFF

27.5 - Fonderie

Une violente projection d'aluminium en fusion dans une fonderie, lors d'un transfert d'aluminium d'un four de maintien dans une lingotière, atteint 7 personnes (blessures légères pour 2 ouvriers de la fonderie et plus sérieuses pour 2 ouvriers d'une entreprise sous-traitante qui devait nettoyer ce four accidenté). Il n'y a pas de conséquence à l'extérieur. L'eau présente dans la lingotière et à l'origine de la projection provenait du nettoyage préalable de la lingotière (poteyage). Suite à l'accident le personnel de l'entreprise et du sous-traitant font l'objet d'une information spécifique sur ce type d'accident. Un mode opératoire est mis en place (préchauffe des lingotières à 250°C pour éliminer l'eau, avec contrôle de la température et examen visuel de l'absence d'eau avant d'entreprendre la coulée) et prévoit aussi une limitation du nombre d'intervenant sur l'installation.

N° 17548 - 10/04/2000 - ETATS-UNIS - LEETSDALE

27.5 - Fonderie

Une explosion se produit dans une fonderie. Elle blesse 5 employés dont 2 sont grièvement brûlés (2ème et 3ème degré). Les effets sont importants : des tuyauteries d'eau sont tordues, des moules de plus de 350 kg détruits. La cause suspectée est la migration d'eau dans le cuivre fondu : en effet, le cuivre en fusion est versé dans un moule, refroidi ensuite dans un bain d'eau de manière à constituer des lingots. Le cuivre en fusion a pu emprisonner de l'eau qui s'est transformée en vapeur du fait de la température, est montée en pression puis a provoqué l'explosion. Une fuite du circuit de refroidissement à proximité de la zone de coulée est suspectée. Il est à noter que l'équipement de sécurité dans la zone de coulée est constitué d'une veste protectrice (aluminium) ainsi que de pantalons de même type et de casques. Un des blessés ne les portait pas ce jour-là.

N° 17552 - 11/04/2000 - 78 - BONNIERES-SUR-SEINE

27.1 - Sidérurgie

Dans une aciérie électrique, après le vidage du four (70 t par coulée) dans une poche, un employé intervient pour boucher l'orifice de vidange ; il s'agit de la seule opération non encore automatisée. Lors de son entrée dans le Dog House, confinement en béton réalisé autour du four, une explosion d'eau vaporisée au contact de l'acier en fusion se produit et l'employé décède sur le coup. Le four est endommagé : couvercle sorti de son axe, abside projetée à plusieurs mètres... Une défaillance matérielle (fuite d'eau sur le circuit de refroidissement) est suspectée. L'entrée prématurée de l'employé dans l'enceinte de protection alors que le four n'était pas revenu en position normale aurait été la cause fortuite de l'atteinte corporelle de la victime. Une enquête judiciaire est effectuée.

N° 19925 - 07/12/2000 - 54 - PONT-A-MOUSSON

27.5 - Fonderie

Dans un haut-fourneau, lors d'une coulée de fonte, une fuite de métal en fusion se déverse dans une rigole d'eau de refroidissement et provoque de fortes détonations. Durant les opérations de mise en sécurité et de réparations provisoires, afin de maintenir l'équilibre de pression des gaz, les gaz chargés en poussières carbonées et ferreuses (1 à 10 g/Nm³) sont relargués pendant 20 min à 3 reprises. Le rejet, effectué directement au niveau du gueulard, ne passe pas par le laveur primaire dont le débouché des purges de sécurité, plus bas de 15 m, pourrait mettre en danger les employés du site. Les conditions atmosphériques favorisent une retombée rapide mais plus concentrée des poussières sur des véhicules en stationnement dans les environs. La rehausse des débouchés du laveur est étudiée.

N° 21914 - 15/01/2002 - 59 - GRAVELINES

27.4 - Production de métaux non ferreux

Une explosion provoquée par un contact eau - métal en fusion entraîne la projection d'environ 4 t d'aluminium à 950 °C dans un atelier de prétraitement de l'aluminium après sa fabrication par électrolyse et avant son passage en fonderie. L'incendie qui se déclare sur 2 portes de l'atelier est rapidement maîtrisé par les employés dont 2 sont victimes de brûlures. L'engin de manutention de la poche d'aluminium et le pupitre de commande d'une machine automatique sont endommagés. Le prétraitement réalisé par le procédé TAC (Traitement de l'Aluminium en Creuset) consiste à injecter du fluorure d'aluminium (AlF₃) dans le métal en fusion pour former un mélange de cryolithe (F₆AlNa₃) et d'alumine qui est ensuite mécaniquement écrémé en surface. L'outil écrémeur est poteyé (recouvert d'une couche de produits minéraux en phase aqueuse) 2 fois par semaine afin de limiter l'adhérence de l'aluminium en fusion. Cette opération est effectuée manuellement au pinceau par un opérateur et l'automate de l'écrémeur est programmé pour maintenir l'outil au-dessus de la poche de métal en fusion le temps de son séchage. Le contact du poteyage encore chargé d'eau et du métal en fusion serait à l'origine de l'explosion (temps de séchage trop court ?). La rupture de la soudure de la partie mobile de l'écrémeur est constatée. L'inspection des installations classées constate les faits.

N° 23488 - 27/09/2002 - ETATS-UNIS – SEGUIN

27.5 - Fonderie

Une explosion se produit au niveau d'un four dans une aciérie spécialisée dans le recyclage des métaux. 2 employés qui se trouvaient à proximité sont sérieusement brûlés (92% et 70% du corps) et hélicoptés vers un hôpital proche. 3 j plus tard, ils sont toujours dans un état critique. Selon un communiqué de presse de l'exploitant, l'explosion serait due à la mise en contact d'une fuite d'eau avec du métal fondu. La réaction de vaporisation aurait été violente. L'OSHA (Occupational Safety and Health Administration) effectue une enquête.

N° 23183 - 29/09/2002 - FRANCE - 65 - LANNEMEZAN

27.4C - Production d'aluminium

Lors de la coulée d'un four d'aluminium, une fuite de métal liquide a lieu au niveau de l'équipement de liaison (bec) entre la poche du four et la goulotte d'alimentation de la fosse de coulée. L'aluminium remplit le bloom de vidange, puis rejoint par débordement la gaine d'aspiration des gaz de la poche ; une importante projection de métal provoque alors l'ouverture des tampons pleins de la gaine. Les employés maîtrisent des départs de feu initiés par contact entre l'aluminium projeté à plusieurs mètres et les matériaux combustibles présents (gaine, huile, graisse, balai, etc...). Les secours publics sont alertés à titre de précaution. Il n'y a aucun blessé et les dommages matériels sont limités.

N° 23317 - 15/10/2002 - 52 - BROUSSEVAL

27.5 - Fonderie

Dans une fonderie, lors du transfert d'une poche de fonte en fusion entre 2 bâtiments de production, l'engin de manutention bascule dans le canal des MOULINS. Une explosion se produit sous le pont situé à proximité. Des projections et l'effet de souffle endommagent les bâtiments voisins (fenêtres brisées, bardage et toiture partiellement soufflés, pont détruit. Quatorze personnes sont blessées dont 2 hospitalisées. L'explosion est due au contact du métal en fusion avec l'eau.

N° 23912 - 17/01/2003 - 63 - LES ANCIZES-COMPS

27.1 - Sidérurgie

Dans une fonderie d'acier, l'un des fours de fusion par induction se perce (capacité 1t). Le métal en fusion entre en contact avec l'eau de refroidissement du bobinage d'induction et provoque une explosion qui soulève le couvercle du four. Du métal fondu est projeté dans un rayon de 5 m. Par le perçage, l'acier se déverse dans la fosse technique à la base du four et incendie des câblages et équipements électriques voisins endommageant ainsi 3 autres fours (capacités 500 kg et 2 x 100 kg). Les opérateurs alertent le poste de garde qui alerte à son tour les pompiers selon la procédure d'alerte incendie. L'ensemble du personnel est évacué pendant que l'équipe de maintenance coupe l'alimentation électrique du bâtiment. Les pompiers interviennent pour fermer une vanne d'alimentation en oxygène placée au-dessus du four et maîtrisent l'incendie. Les 4 fours endommagés seront arrêtés pendant plusieurs semaines. La production pourra se poursuivre sur un 5ème four de 3 t de capacité après vérification de l'absence de dommage. Cet accident, étudié dans le cadre de l'étude de danger de l'établissement (explosion par contact eau - métal en fusion), n'a pas eu d'impact (suppression, flux thermique) à l'extérieur du bâtiment abritant les installations. La demande de réalisation d'un plan de secours interne à l'établissement sera formalisée dans l'arrêté d'autorisation en cours de réactualisation.

N° 24750 - 11/06/2003 - 59 - DUNKERQUE

27.1 - Sidérurgie

Durant une coulée sur l'un des hauts-fourneaux (H-F) d'une usine sidérurgique, une réaction se produit dans une fosse de déversement du laitier (résidu de fusion) occasionnant des projections de blocs de 1 à 3 kg de matières chaudes dans un rayon d'une centaine de mètres. De petits foyers d'incendies, rapidement maîtrisés par le service de sécurité incendie de l'entreprise, se déclarent sur une centaine de câbles aériens, dans un rack du réseau de télécommunication et dans des bennes à déchets situées à 25 m. Une douzaine de voitures stationnées à 100 m du H-F est endommagée (bris de glaces et impact sur carrosserie), ainsi qu'une pelle hydraulique dont les flexibles sont à changer. Des impacts sont constatés sur des bardages métalliques et les toitures des installations environnantes. La production de 2 des H-F est arrêtée pendant 2 h, dont 1 pour destruction de câbles de liaison du broyage charbon. Un autre est ralenti par la perte de l'alimentation en oxygène.

Jusqu'à la remise en état des communications entre les unités, la production est maintenue avec difficultés plusieurs heures. Selon l'exploitant 2 anomalies se sont conjuguées dans la fosse à laitier : présence de fonte et d'eau ou d'un corps étranger. Des mesures préventives sont prises pour renforcer le contrôle des fosses à laitier des H-F, faisant suite à 2 incidents similaires en 1998 et 2002. L'inspection des installations classées propose au Préfet un arrêté imposant à l'exploitant une étude des dispositifs à mettre en place pour limiter les conséquences d'un incident similaire, et des prescriptions pour l'aménagement (évacuation de l'eau et signalisation de l'interdiction de dépôt de corps étranger), l'exploitation (consignes) et les contrôles réguliers des fosses à laitier.

N° 26928 - 14/04/2004 - FRANCE - 87 - LE PALAIS-SUR-VIENNE

27.1Y - Sidérurgie

Vers 19h30, 5 à 6 explosions de vapeur en moins de 60 s endommagent le four (1 550 °C) d'un établissement revalorisant des déchets industriels par pyrométallurgie. L'accident est dû à un contact brutal eau de refroidissement / métal et laitier en fusion après percement de la paroi latérale du four en raison d'une usure des réfractaires ; 2 à 3 t de métal fondu et 35 t de laitier se répandent dans le bâtiment. Trois employés sont hospitalisés pour des examens auditifs ; l'un d'eux situé à 20 m du lieu de l'explosion présente une lésion d'un tympan mais sans effet irréversible. Des dommages matériels sont observés : vitre de la salle de commande de 17 mm d'épaisseur détruite à 11 m de l'explosion, murs ébranlés mais non effondrés, bris de vitres et petits dommages dans un rayon de 40 m, fusion d'une partie de la goulotte, tuyauteries endommagées... Les installations hors d'usage sont mises en sécurité. L'inspection des installations classées effectue une enquête. Une expertise évalue le terme source de l'explosion à 200 g de TNT, soit la détente brutale de 55 à 1 bar d'un peu plus de 1 l d'eau à sa température maximale de surchauffe (270 °C). Après percement du four (orifice de 66 cm de long sur 15 cm de haut au-dessus de la zone de coulée), la 1ère explosion résulterait du contact d'une faible quantité d'eau et de matière en fusion vers la zone de coulée. La 2ème ferait suite à l'arrivée de cette matière dans la goulotte de collecte de l'eau de refroidissement du casing du four (film liquide de faible épaisseur dans la goulotte). La 3ème explosion, 10 s après la 1ère et la plus violente selon les témoins, résultant de l'emprisonnement d'eau, accumulée localement, par de la matière en fusion s'écoulant dans les zones d'évacuation de la goulotte (tuyauteries). Les autres explosions de faible ampleur seraient dues à des contacts aléatoires eau / matière fondue. Les réfractaires refaits en janvier 2004 seront expertisés ; une abrasion prématurée après micro-fracturation à la suite d'un défaut de montage ne permettant pas un espace de dilatation suffisant est évoquée. Plusieurs mesures sont prises : renforcement des mesures de température et de leur interprétation pour prévenir un percement du four, limitation des zones potentielles d'accumulation d'eau pour en prévenir le contact avec la matière fondue, rédaction de consignes définissant les actions à réaliser par les opérateurs et à assurer leur protection en situation accidentelle.

N° 27316 - 14/06/2004 - 71 - CHALON-SUR-SAONE

28.5 - Traitement des métaux ; mécanique générale

Dans un atelier de fonderie de 500 m² d'une usine de mécanique générale, une explosion détruit un four électrique contenant 500 kg d'aluminium. La percée du four et le contact du métal en fusion avec l'eau de refroidissement de la bobine d'induction sont à l'origine de l'accident. Un employé choqué est hospitalisé 2 h pour des examens.

N° 28574 - 18/11/2004 - 57 - GANDRANGE

27.1 - Sidérurgie

Une poche de 160 t d'acier liquide bascule, puis se décroche vers 3 h dans une usine sidérurgique lors de son levage par le pont roulant sur rails reliant la station d'affinage à la coulée continue. Une explosion se produit quand le métal en fusion entre en contact avec le béton humide du sol de l'atelier hors de la fosse de récupération. Les pompiers éteignent l'acier en fusion. Un employé brûlé par le rayonnement thermique de l'acier à 1 500 °C est hospitalisé, 6 autres sont légèrement blessés par la déflagration.

Le bardage du bâtiment et des protections en tôle de l'atelier voisin sont soufflées. Le positionnement incorrect de l'un des 2 crochets sur la poche de métal et un contrôle (prévu par une consigne) insuffisant par l'agent chargé de la vérification du bon accrochage de la charge sont à l'origine de l'accident. Les dommages matériels sont évalués à 500 K€ et les pertes de production à 700 K€.

N° 29633 - 08/04/2005 - AUTRICHE - 00 - KAPFENBERG

27.5C - Fonderie d'acier

Une explosion dans une fonderie d'acier provoque le décès de 4 employés. Six autres salariés sont blessés dont 3 grièvement ; l'un d'entre eux décède 2 jours plus tard. Un contact eau / métal en fusion pourrait être à l'origine de l'accident

N° 29851 - 16/05/2005 - FRANCE - 59 - GRANDE-SYNTHÉ

27.1Y - Sidérurgie

Dans une usine sidérurgique Seveso, deux explosions et un dégagement de fumées rougeâtres se produisent vers 11 h durant la coulée de la fonte en fusion d'un wagon poche tonneau de 450 t dans une fosse au niveau du sol. L'opérateur arrête immédiatement le déversement. Cette coulée avait été décidée après la détection d'un défaut au niveau du bec verseur du wagon qui ne permettait pas le transfert normal de la fonte dans des poches droites. Alertés par de nombreux appels téléphoniques, les pompiers conseillent à leurs interlocuteurs de se confiner. Aucun blessé n'est à déplorer, le poste de commande de la coulée étant protégé (bunker) et un périmètre de sécurité étant délimité de façon permanente autour des fosses. Un contact eau / métal en fusion est à l'origine de l'accident ; la coulée anormalement rapide de la fonte a confiné l'humidité des stériles constituant le fond de fosse et provoqué l'explosion de vapeur. La coulée des 250 t résiduelles, effectuée sans incident vers 12h30, générera néanmoins un nouveau panache rougeâtre.

N° 31153 - 15/12/2005 - RUSSIE - 00 - SOSNOVY BOR

27.5 - Fonderie

Une explosion se produit vers 3 h sur un four de fusion dans une fonderie située à 2 km d'une centrale nucléaire dont elle recycle les éléments métalliques usagés. Trois employés sont gravement brûlés ; l'un d'entre eux décède le lendemain. Un contact eau / métal en fusion serait à l'origine de l'accident. Selon les autorités russes, l'accident n'a pas provoqué de relâchement de radioactivité dans l'environnement. Une enquête judiciaire est effectuée.

ANNEXE 2

**Projections explosives de métal liquide dans les
fonderies d'aluminium.
Causes et prévention.**

ANNEXE 3

**Extrait du Recueil de directives pratiques sur la sécurité
et la santé dans l'industrie du fer et de l'acier de l'OIT
concernant la prévention des explosions de poche de
métal en fusion**

« 7.7. Manutention du métal en fusion, de l'écume ou du laitier

7.7.1. Description des dangers

7.7.1.1. Des brûlures risquent de se produire à différentes étapes du processus de fabrication de l'acier: devant le haut-fourneau lors de la coulée; en raison des déversements, des éclaboussures ou des projections de métal chaud provenant des poches ou des récipients pendant le procédé, lors de la coulée ou du transport; et lors de contacts avec du métal en fusion en cours de transformation.

7.7.1.2. Les trous de coulée devraient être vérifiés périodiquement en vue de déceler tout endommagement ou accumulation de corindon et, partant, d'éviter des projections de métal en fusion.

7.7.2. Evaluation des risques

7.7.2.1. Une évaluation à toutes les étapes des procédés devrait avoir lieu pour déterminer les risques de lésions résultant de la manutention du métal en fusion. Elle devrait porter sur l'état, la stabilité et l'utilisation des fours et des poches, la nature et l'utilisation des grues et des véhicules de transport et les systèmes utilisés pour verser le métal en fusion.

7.7.3. Mesures de prévention

7.7.3.1. Formation

7.7.3.1.1. Les travailleurs chargés de la manutention du métal en fusion devraient avoir reçu une formation sur les procédures à suivre et les mesures de sécurité et de santé à respecter, y compris l'utilisation de l'équipement de protection individuelle approprié.

7.7.3.1.2. Un document attestant que le travailleur a suivi la formation devrait être délivré, et la formation devrait être actualisée s'il y a lieu.

7.7.3.1.3. Les personnes n'ayant pas reçu la formation nécessaire ne devraient pas être employées au transport du métal en fusion.

7.7.4. Méthodes de travail

7.7.4.1. Généralités

7.7.4.1.1. Seul le personnel indispensable devrait être admis à proximité des opérations de coulée.

7.7.4.1.2. Les moules et les entonnoirs de coulée ne devraient pas contenir d'humidité; il ne devrait y avoir aucun risque d'introduction d'eau dans la masse fondue en raison du risque d'explosion.

7.7.4.1.3. Un cordon de sécurité devrait être installé au préalable autour de la zone de transport du métal en fusion s'il existe un risque de déversement accidentel.

7.7.4.2. Inspection de sécurité des poches

7.7.4.2.1. Une personne compétente devrait régulièrement inspecter les godets et les bennes, ainsi que leurs mécanismes de soutien, de verrouillage et de basculement.

7.7.4.2.2. Avant chaque remplissage, les travailleurs devraient inspecter les poches de coulée, de transport de laitier, ainsi que les dispositifs connexes.

7.7.4.2.3. Les résultats des contrôles, y compris les mesures correctives prises lorsqu'une fissure ou une autre déféctuosité est constatée, devraient être enregistrés.

7.7.4.2.4. Les réparations recommandées devraient être prévues et effectuées dans un délai approprié.

7.7.4.2.5. Il faudrait prévoir un système qui permet de vérifier et de s'assurer que les mesures correctives ont été exécutées.

7.7.4.3. Equipement de protection individuelle

7.7.4.3.1. Des équipements de protection individuelle appropriés, tels que casques, gants, tabliers et bottes devraient être fournis et utilisés, ainsi que des vêtements résistant au métal fondu, s'il y a lieu.

7.7.4.4. Premiers secours

7.7.4.4.1. Les lésions causées par le métal en fusion, l'écume, le laitier ou l'exposition à des poussières alcalines devraient immédiatement faire l'objet de soins . »

ANNEXE 4

**Données relatives à la gestion de la sécurité de
l'entreprise Aciérie De l'Atlantique de Le Boucau :**

Compte rendu d'accident

Fiche de poste production du four de fusion

**Identification, évaluation et hiérarchisation des risques
liés au four**