

Explosion lors de l'assainissement de la décharge industrielle de Bonfol : analyse de l'événement

Votre signe :	J.-P. Meusy	Référence :	Expertise Bonfol	Responsable :	A. Koch / F. Ubertini
Notre signe :	A. Koch / F. Ubertini	No Ident. :	18092010	Téléphone :	+41(0)21 732 10 36
Requête technique :	HP. Kaufmann			e-mail :	andrejoseph.koch@gmail.com

Résumé

Sur la base des observations portées à notre connaissance, nous suggérons que l'explosion qui s'est produite le 7 juillet 2010 dans la halle d'excavation de Bonfol est une combustion rapide ou une déflagration d'une substance inflammable avec un chlorate. D'après nos estimations, la quantité de matériau ayant réagi est de l'ordre de 8 kg à 30 kg. L'énergie libérée est estimée entre 8 MJ et 30 MJ, ce qui correspond à l'explosion de 2 kg à 7 kg de TNT. Au vu de cette énergie, l'incident est conséquent.

Nos conclusions quant à la masse de matière ayant réagi et à l'énergie libérée corroborent celles du *Sicherheitsinstitut* de Bâle. Sur la base de ces travaux, on définit l'explosion majeure contre laquelle on souhaite se protéger comme correspondant à **la détonation de 10 kg de TNT**.

Les mesures de protection déjà prises (pelle mécanique avec cabine pressurisée et vitrage avant blindé) ont évité au machiniste des atteintes physiques graves (dégâts auditifs, blessures sérieuses), mais se sont révélées insuffisantes. Des mesures de sécurité supplémentaires doivent être mises en place. Celles-ci ne font cependant pas l'objet du présent rapport.

Distribution du rapport

- Jean-Pierre Meusy, responsable du dossier DIB
République et Canton du Jura
2800 Delémont
- Office de l'Environnement
République et Canton du Jura
2882 Saint-Ursanne

Suivi des modifications

Version	Date	Description, remarques	Nom ou rôle
1.01	15 décembre 2010	Première version du rapport	André Koch

Pour le rapport :

Dr. André Koch
Dynamic Phenomena Sàrl
Chemin de Palud 2
CH-1053 Cugy (VD)



Figure 1: Halle d'excavation construite sur le site de la décharge industrielle de Bonfol. *bci Betriebs-AG* est responsable de la planification et de la mise en œuvre de l'assainissement de la décharge. Elle est mandatée par les entreprises de la *Basler Chemische Industrie*.

1 Les faits portés à notre connaissance



Figure 2: Images saisies par une caméra de surveillance, juste avant l'explosion. Sur l'image (3) on distingue clairement l'initiation de l'explosion ; dès l'image suivante, la caméra est hors d'usage. La couleur orangée de la flamme suggère une réaction avec du calcium (de fortes concentrations de calcium ont été observées dans les échantillons analysés).

- Une forte explosion a eu lieu mercredi 7 juillet 2010, vers 14 heures, dans la halle d'excavation (figure 1) de la décharge industrielle de Bonfol, lors de travaux avec une pelleteuse (figure 2). L'homme qui manœuvrait l'engin de chantier a pu quitter la halle d'excavation par ses propres moyens. Au moment de l'explosion, le godet de la pelleteuse était vide.
- La Police Scientifique de Zurich, mandatée par les autorités cantonales jurassiennes, a effectué des prélèvements d'échantillons en divers lieux, en vue de déterminer les causes de l'incident ; trois séries d'échantillons ont été prélevées :
 1. une première sur le toit de l'installation, le 8 juillet 2010
 2. une seconde sur la pelleteuse, le 13 juillet 2010
 3. une troisième à l'endroit même de l'explosion, le 2 septembre 2010.

Les analyses ont démontré la présence de *chlorates*, substances extrêmement réactives, ainsi que des concentrations élevées de *chlorures* et de calcium.

- Les dégâts observés sont les suivants.
 1. Le godet de la pelleteuse qui a déclenché l'événement présente un renflement des surfaces latérales dû aux contraintes mécaniques de l'explosion. La vitre blindées avant de la pelleteuse est fissurée ; les vitres latérales de la cabine pressurisée (verre normal) ont cédé.
 2. Le cratère de l'explosion a un diamètre de l'ordre de 2 m à 3 m ; sa profondeur et son volume sont inconnus.
 3. Des 88 exutoires de fumée (dômes en plexiglas, dimensions 2 m×2.6 m) situés sur le toit de l'installation, 22 ont été endommagés ou se sont ouverts en raison du souffle de l'explosion. Deux projectile ont perforé les tôles du toit de la halle, provoquant des trous de \varnothing 5 à 6 cm
 4. Sur la façade sud de la halle, des panneaux de tôle ont été repoussés vers l'extérieur.

2 Documentation relative à l'incident

Notre travail se base sur les documents suivants :

1. Communiqué de presse commun de *bci Betriebs-AG* et de la République et Canton du Jura, du 7 juillet 2010, *Décharge industrielle de Bonfol. Suite à l'explosion locale : l'enquête scientifique se poursuit – les autorités compétentes autorisent le transport des matériaux déjà préparés.*
2. Lettre du *Forensisches Institut Zürich* à M. Henri-Joseph Theubet de la police cantonale jurassienne, du 27 juillet 2010.
3. Rapport de l'Institut de Sécurité pour *bci Betriebs-AG*, du 19 août 2010, *Prise de position concernant les mesures de sécurité pour la 3ème prise d'échantillon suite à l'explosion.*
4. Rapport final du *Forensisches Institut Zürich* au commandement de la Police Cantonale Jurassienne (*Spurensicherungsbericht K100709-059*), L. Widmer et R. Widmer, 12 octobre 2010.
5. Ebauche du rapport de l'Institut de Sécurité pour *bci Betriebs-AG*, *Hypothesen zum Explosionsereignis des 7. Juli 2010 bei der Sanierung der Deponie in Bonfol*, D. Gandini, P. Lerena et M. Steinkrauss, 19 octobre 2010.

3 Le Rapport de la Police Scientifique

3.1 Echantillons prélevés

Comme déjà mentionné, des échantillons ont été prélevés pour analyse aux lieux suivants :

- sur le toit de la halle, en divers points
- sur l'avant du bras de la pelleteuse, près du godet
- sur le milieu du bras de la pelleteuse
- sur la cabine de la pelleteuse
- dans le cratère produit par l'explosion

- assez loin, à droite et à gauche (par rapport au poste de commande) du cratère d'explosion (échantillons de référence)
- à proximité d'un fût éventré laissant échapper une poudre blanche
- enfin des échantillons de référence provenant de la décharge ont également été sauvegardés.

3.2 Substances détectées dans les échantillons

- des chlorures (Cl^-) en concentration élevées à très élevées
- des sulfates (SO_4^{2-}) en concentration élevées
- des chlorates (ClO_3^-) en concentrations importantes dans les échantillons provenant du bras de la pelleteuse et du toit de la halle
- des ions sodium (Na^+) et calcium (Ca^{2+}) en concentrations importantes ; la concentration en sodium est plus élevée dans les échantillons prélevés sur la pelleteuse que dans les échantillons de référence
- des ions magnésium (Mg^{2+}), potassium (K^+) et ammonium (NH_4^+) en traces.

La mise en évidence de chlorates est un point important du rapport de la Police Scientifique de Zurich ; les chlorates sont en effet connus pour réagir facilement (faible énergie d'activation) et violemment (risque d'explosion) avec de nombreux combustibles.

En résumé, les experts de la Police Scientifique zurichoise arrivent aux conclusions suivantes.

1. Les substances ayant réagi lors de l'incident du 7 juillet 2010 n'ont pu être identifiées avec certitude ; on peut cependant exclure l'implication d'explosifs civils (par exemple, la nitroglycérine) ou militaires (par exemple, PETN, RDX ou HMX) ainsi que de poudres propulsives (comme TATP) dans l'incident.
2. Les composés détectés et leurs concentrations laissent penser que l'explosion a été provoquée par réaction de chlorate de sodium (NaClO_3 , le comburant) avec une (ou plusieurs) substance inflammable (le combustible, dont la nature reste inconnue).
3. Les images vidéo de l'incident (figure 2) indiquent que l'explosion a été déclenchée par la pression ou par le frottement du godet de la pelle mécanique sur les substances ayant réagi.

Les enregistrements vidéo montrent que, à proximité du lieu de l'explosion et peu avant celle-ci, la pelleteuse éventre un fût contenant une poudre blanche. L'analyse des échantillons de cette poudre n'a pas permis de déterminer avec précision sa nature (elle contient des liaisons organiques). Un lien entre cette poudre blanche et l'explosion n'a pu être établi.

4 Chimie des chlorates

L'industrie chimique utilise essentiellement 4 types de chlorates :

1. le chlorate de sodium NaClO_3 (chlorate de soude)
2. le chlorate de potassium KClO_3
3. le chlorate de baryum $\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$
4. le chlorate d'ammonium NH_4ClO_3 .

Ce sont des agents oxydants qui peuvent provoquer des incendies, voire des explosions, s'il sont mis en contact avec des substances réductrices, telles que

- le phosphore rouge
- des substances organiques (sciure de bois, parafine...)
- des poudres métalliques.

4.1 Chlorate de Sodium

Chlorate de sodium	NaClO_3
Température de fusion	248 – 261 °C
Température de décomposition	265 – 300 °C
Solubilité dans l'eau froide	790 g/l
Solubilité dans l'eau bouillante	2300 g/l
Fortement hygroscopique	

Usage. Le chlorate de sodium est utilisé comme désherbant et en pyrotechnie (feux de couleur jaune ; poudres flash, en raison de sa combustion rapide).

Dangers. C'est un puissant oxydant* qui réagit avec, notamment, de nombreux composés organiques (p.ex. laine et coton), provoquant incendies et explosions.

Contacts à éviter. Entre autres : les poudres de métaux ; les métaux alcalino-terreux (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) ; les métalloïdes (B, Si, Ge) et leurs oxydes ; les oxydes métalliques ; les composés à base d'ammonium (NH_4), de cyanure (CN), de sulfure (S^{2-}) ; les composés organiques ; les composés organiques nitrosés (R- NO_2) ; l'acide sulfurique (H_2SO_4) ; les substances inflammables.

4.2 Chlorate de potassium

Chlorate de potassium	KClO_3
Température de fusion	356 °C
Température de décomposition	400 °C
Solubilité dans l'eau froide	71 g/l
Solubilité dans l'eau bouillante	570 g/l

Usage. Le chlorate de potassium est utilisé, entre autres, comme agent oxydant, comme désinfectant et en pyrotechnie (feux violacés ; fabrication de poudres flash).

Dangers. C'est un puissant oxydant qui réagit avec de nombreux composés, provoquant incendies et explosions.

Contacts à éviter. Entre autres : les poudres de métaux ; les métaux alcalins (Li, Na, K) ; les composés à base d'ammonium (NH_4 , p.ex. l'ammoniaque NH_4OH), de cyanure (CN), de sulfure (S^{2-}), d'hydruure (H^-) ; les composés organiques ; les alcools (R-OH) ; le phosphore (P) ; le fluor (F) ; le soufre (S).

*Les chlorates sont des oxydants plus puissants et plus sensibles que les nitrates.

Remarques diverses.

- Les mélanges du chlorate de potassium avec le soufre S, le phosphore P, l'iode I, le carbone C sont extrêmement sensibles au frottement et sensibles à l'impact. La sensibilité diminue en solution aqueuse ou dans l'éthanol.
- le mélange de KClO_3 et de phosphore rouge est très sensible aux décharges électrostatiques ; en présence d'un confinement adéquat, la combustion du mélange dégénère en une déflagration.
- Des précautions particulières sont à prendre lors de contamination de KClO_3 par de l'ammoniaque ou des acides (la réaction d'oxydation peut devenir rapide dès 200 °C).

Sensibilité à la friction et au choc. Deux exemples pour illustrer la sensibilité des chlorates.

- Mélange 80% KClO_3 / 20% Lactose :
 - Combustion rapide vers 200 °C.
 - Sensibilité au frottement[†] : 20 N.
 - Sensibilité au choc : (a) Masse de 5 kg, hauteur de chute 1 m : déflagration ;
(b) Masse de 5 kg, hauteur de chute 0.5 m : départ de feu.
- Mélange 80% KClO_3 / 20% Acétal (polymère) :
 - Sensibilité au frottement : 80 N.
 - Sensibilité au choc : (a) Masse de 5 kg, hauteur de chute 0.5 m : déflagration ;
(b) Masse de 5 kg, hauteur de chute 0.15 m : départ de feu.

4.3 Chlorate de barium

Chlorate de barium	$\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2$
Température de fusion	248–261 °C
Température de décomposition	≥ 250 °C
Solubilité dans l'eau froide	790 g/l
Solubilité dans l'eau bouillante	2300 g/l

Usage. Le chlorate de barium est utilisé en pyrotechnie (feux verts) ; carburant pour fusées.

Dangers. Le chlorate de barium est un oxydant puissant qui peut réagir de manière explosive avec les matières combustibles ; il est encore plus instable et sensible au frottement que le chlorate de potassium.

Contacts à éviter. Entre autres : les métaux en poudre ; les composés organiques ; le soufre S ; le phosphore P ; les sulfates (SO_4^{2-}) ; les sulfures (S^{2-} , p.ex. sulfure d'antimoine Sb_2S_3) ; les sels d'ammonium.

Remarques diverses.

- On le désensibilise contre les réactions acides avec du carbonate de barium BaCO_3 .
- La substance se décompose violemment, produisant de l'oxygène et des fumées toxiques, avec risques d'incendie et d'explosion.
- Le chlorate de barium est extrêmement instable en présence de poudres métalliques.
- Le chlorate de barium est très sensible au frottement.

[†]Test selon la méthode de la Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). On considère qu'une substance présente un danger d'explosion lorsque sa sensibilité au frottement est inférieure à 360 N.

4.4 Chlorate d'ammonium

Chlorate d'ammonium	NH₄ClO₃
Température de fusion	
Température de décomposition	102 °C
Solubilité dans l'eau froide	287 g/l
Solubilité dans l'eau bouillante	1150 g/l

Usage. Utilisé pour dégrader certaines résines époxy.

Dangers. C'est un puissant oxydant, instable même à température ambiante (il peut exploser spontanément s'il est laissé quelques minutes au soleil). Il reste instable, même en solution.

Contacts à éviter. Incompatible avec tout matériau réducteur.

Remarques diverses.

- Le chlorate d'ammonium est sensible à la chaleur (explose lorsque chauffé à 100°C) et au choc.
- Le chlorate d'ammonium est très sensible aux impuretés.
- Le chlorate d'ammonium peut exploser en solution ; il faut éviter la dessiccation d'une solution de chlorate d'ammonium.

5 Puissance de l'explosion

Considérons un milieu explosible solide. Pour un tel milieu, le terme *explosion* recouvre plusieurs phénomènes physiques distincts, que l'on peut classer en fonction de la vitesse de propagation v_r du front de réaction.

1. *Combustion rapide*[‡] : le front de réaction se déplace à faible vitesse v_r à travers le matériau réactif (ordre de grandeur, $0 \text{ m/s} \leq v_r \leq 100 \text{ m/s}$).
2. *Déflagration* : le front de réaction se déplace à vitesse v_r infrasonique (relativement au milieu réagissant) ; il est souvent précédé d'une onde de choc qui sensibilise le matériau réactif (ordre de grandeur, $100 \text{ m/s} \leq v_r \leq 1\,000 \text{ m/s}$).
3. *Détonation* : le front de réaction se déplace à vitesse v_r supersonique à travers le matériau réactif ; c'est une combinaison stable entre une onde de choc et un front de réaction (ordre de grandeur, $1\,000 \text{ m/s} \leq v_r \leq 10\,000 \text{ m/s}$).

Dans le cas qui nous intéresse (chlorates), la réaction libère quelques mégajoules par kilogramme de substance réagissant ; pour fixer les idées, on utilisera pour les estimations une valeur de 2 MJ/kg. La vitesse de réaction n'influence pas l'énergie libérée par une réaction chimique donnée, mais plus elle est élevée, plus les débris projetés auront eux-même une vitesse importante.

Les caméras vidéo dans la halle d'excavation ont filmé l'incident avec 3 images par secondes ; sur la troisième image de la séquence reproduite dans la figure 2, on observe le départ du feu (l'image suivante de cette caméra est saturée). Qu'on ait pu filmer cet événement prouve que, du moins initialement, on est en présence d'un événement "lent" de type *combustion*, éventuellement *déflagration* d'une durée de quelques 100 ms (intervalle temporel entre 2 images de la vidéo, 300 ms), et non d'une détonation.

Une détonation est à exclure pour une autre raison encore. Le godet de la pelle mécanique présente un renflement latéral (de l'ordre du centimètre). Ceci montre que le travail de déformation mécanique s'est effectué lentement. Une détonation aurait-elle eu lieu, la très rapide

[‡]Nous traduisons par *combustion rapide* le terme allemand *Verpuffung*.

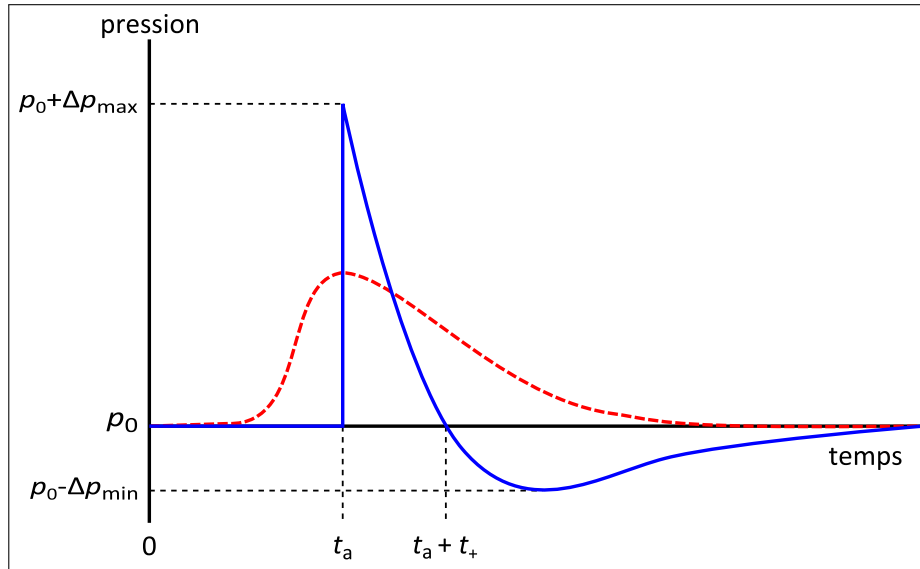


Figure 3: Profil de surpression derrière une onde de choc dans l'air produite par une détonation initiée en $t = 0$ (courbe continue en bleu) et exemple d'un profil possible de surpression dans le cas d'un événement avec combustion rapide (courbe en traitillé rouge): la surpression maximale est inférieure au cas de la détonation, mais sa durée d'action est supérieure. Dans ce graphique, p_0 est la pression ambiante, Δp_{\max} et Δp_{\min} sont respectivement la surpression maximale et la dépression maximale dans le profil de pression produit par la détonation; t_a est le temps d'arrivée de l'onde de choc au point de mesure et t_+ la durée de la phase positive de l'onde de choc.

libération d'énergie aurait endommagé le godet au point de contact; on observerait également un bleuissement local de l'acier en raison des températures initialement élevées des produits de détonation et de la chaleur dégagée par le travail de déformation plastique du métal.

Ce qui précède suggère que la surpression effective dans l'incident s'écarte de celle observée lors d'une détonation (figure 3); la valeur maximale de la surpression était inférieure à celle que l'on aurait observée avec une détonation libérant une énergie égale, mais sa durée d'action fut largement supérieure. Pour fixer les idées, la durée t_+ de la phase positive de l'onde de choc créée par une détonation de 10 kg de TNT est de l'ordre de quelques millisecondes, alors que l'événement considéré a probablement duré une centaine de millisecondes.

On estime ci-dessous la puissance de l'explosion par quatre méthodes indépendantes.

5.1 Cratère d'explosion

On fait l'hypothèse d'une explosion en surface (cf. figure 2) de matières explosibles solides. Le cratère de détonation fait, selon les témoins, de 2 m à 3 m de diamètre. D'après l'annexe A, on a la relation suivante entre le diamètre D du cratère (en [m]) et la masse W de la substance explosible (en [kg] de TNT):

$$W = 0.16 D^{3.4} \quad \text{avec} \quad 2 \text{ m} \leq D \leq 3 \text{ m} ,$$

soit

$$1.7 \text{ kg TNT} \leq W \leq 7.0 \text{ kg TNT} .$$

5.2 Dégâts au vitrage de la cabine de la pelleteuse

Le vitrage latéral (non blindé) de la pelleteuse a été détruit, ce qui requiert une surpression de l'ordre de

$$\Delta p \geq 70 \text{ mbar} .$$

En admettant une distance d'environ 5 m entre le point d'explosion et le vitrage ayant cédé, on obtient pour la charge au sol (voir Annexe B) :

$$W \geq 0.03 \text{ kg TNT} .$$

5.3 Intensité sonore de l'explosion

Le conducteur n'a, selon nos informations, pas subi de dégâts auditifs. En admettant que la cabine lui procure une protection phonique de 40 dB et en postulant une durée de la surpression de l'ordre de 30 ms à 300 ms, on obtient la surpression maximale suivante (diagramme de Pfander, Annexe C) :

$$100 \text{ mb} \leq \Delta p \leq 350 \text{ mb} ,$$

ce qui correspond, à une distance de 5 m, à l'explosion au sol d'une masse de TNT W dans l'intervalle

$$0.06 \text{ kg TNT} \leq W \leq 0.67 \text{ kg TNT} .$$

5.4 Dégâts au bâtiment

Des panneaux de tôle ont été partiellement arrachés et repoussés vers l'extérieur ; sur le toit, des exutoires de fumée en plexiglas ont été détruits ou ouverts par le souffle. A l'aide de l'Annexe D, on estime que la surpression Δp au niveau du bâtiment est dans l'intervalle

$$35 \text{ mb} \leq \Delta p \leq 140 \text{ mb}$$

(bris de vitres et défaillance des points d'attache de panneaux en tôle ondulée).

On admet que la distance entre le lieu de l'explosion et le toit du bâtiment est de l'ordre de 15 m[§] pour les exutoires les plus proches et de 30 m pour les exutoires endommagés les plus éloignés et pour les panneaux de tôle endommagés. Sur cette base, on estime l'équivalent TNT de l'explosion compris dans l'intervalle

$$0.9 \text{ kg TNT} \leq W \leq 3.5 \text{ kg TNT} .$$

5.5 Dégâts au godet de la pelleteuse

Le godet de la pelleteuse a été légèrement bombé latéralement par l'explosion. Un calcul numérique serait possible pour déterminer la quantité d'énergie nécessaire pour produire les effets observés. Pour des raisons de temps, on renonce à ce calcul.

6 Discussion des résultats

6.1 Type de l'événement

L'explosion observée correspond à une combustion rapide ou à une déflagration ; la détonation est écartée pour trois raisons. (1) on observe le départ du feu sur une image vidéo ; dans le cas d'une détonation, l'image vidéo aurait été directement saturée. (2) Le godet de la pelle

[§]Hauteur du bâtiment : environ 10 m ; profondeur excavée dans le sol : environ 5 m.

mécanique ne présente pas les traces caractéristiques d'une détonation (rupture et bleuissement du métal au voisinage du point de contact avec le matériau détonant). (3) Les estimations de la surpression maximale basées sur les dégâts au vitrage de la pelleteuse (§ 5.2) et sur l'intensité sonore de l'explosion (§ 5.3) conduisent à une masse d'explosif inférieure à celle déterminées par les deux autres méthodes (§ 5.1 et 5.4), ce qui indique que l'événement du 7 juillet 2010 n'était pas une "détonation idéale".

6.2 Equivalent TNT de l'événement

Les 4 méthodes suivies ont livré les résultats suivants pour la masse W de matériau ayant réagi (en équivalent TNT) :

1. Cratère d'explosion : $1.7 \text{ kg TNT} \leq W \leq 7.0 \text{ kg TNT}$;
2. Dégâts aux vitrages de la pelleteuse : $W \geq 0.03 \text{ kg TNT}$;
3. Intensité sonore de l'explosion ; $0.06 \text{ kg TNT} \leq W \leq 0.67 \text{ kg TNT}$;
4. Dégâts au bâtiment : $0.9 \text{ kg TNT} \leq W \leq 3.5 \text{ kg TNT}$.

La 1^{ère} et la 4^{ème} méthode nous semblent les plus sûres dans le contexte qui nous intéresse. La 3^{ème} méthode se base essentiellement sur la valeur de la surpression maximale d'une détonation ; comme nous l'avons déjà écrit (cf. figure 3), l'incident est associé à une combustion rapide ou à une déflagration. La 2^{ème} méthode ne fournit qu'une limite inférieure pour la masse W d'équivalent TNT.

A partir d'ici, on considérera que la masse W ayant réagi est comprise dans les limites suivantes :

$$2 \text{ kg TNT} \leq W \leq 7 \text{ kg TNT}$$

La détonation de 1 kg de TNT libère l'énergie suivante :

$$1 \text{ kg TNT} \rightarrow 4.185 \text{ MJ} .$$

Par suite, l'énergie E_0 libérée lors de l'explosion dans la halle d'excavation de Bonfol est comprise dans l'intervalle

$$8 \text{ MJ} \leq E_0 \leq 30 \text{ MJ} .$$

Il s'agit d'une énergie importante, d'autant qu'elle a été libérée en un très bref laps de temps. En admettant que la durée de l'explosion ait été de 0.1 s, la puissance de l'événement était en gros égale à 100 MW.

6.3 Masse de matériau ayant réagi

Partant de l'hypothèse avancée par la Police scientifique de Zurich que l'explosion a été provoquée par un mélange de chlorates et d'une ou plusieurs substances inflammables, on admet que la réaction chimique dégage environ 2 MJ/kg [¶]. La masse M de substance ayant réagi est alors comprise dans l'intervalle

$$4 \text{ kg} \leq M \leq 15 \text{ kg} .$$

Probablement que les composants réactifs étaient dilués dans des matériaux inertes. Avec un facteur de dilution égal à 2, on arrive finalement à une masse effective M_{eff} ayant réagi de l'ordre de

$$8 \text{ kg} \leq M_{\text{eff}} \leq 30 \text{ kg} .$$

[¶]Estimation de l'énergie libérée par une réaction de chlorates fournie par M. B. Berger, *armasuisse, Sciences et Technologies, Domaine spécialisé Explosifs et Effets*.

Pour donner une idée du volume V_{eff} de matériau ayant réagi, on admet une densité moyenne de 1600 kg/m^3 pour les matériaux dans la décharge. On obtient ainsi

$$5 \text{ dm}^3 \leq V_{\text{eff}} \leq 20 \text{ dm}^3 .$$

7 Comparaison avec les résultats du *Sicherheitsinstitut*

Les experts du *Sicherheitsinstitut* proposent deux méthodes pour évaluer la masse équivalente de TNT associée à l'incident (dimensions du cratère et dégâts observés) ; un troisième test de cohérence (surpression) est basé sur les dommages observés en fonction de la masse d'explosif prédite.

7.1 Dimension du cratère d'explosion

Le *Sicherheitsinstitut* utilise la relation

$$W = 0.21 D^{3.5}$$

pour estimer la masse de l'explosif W en fonction du diamètre D du cratère^{||}. Le diamètre du cratère est estimé à 2.0 m – 2.5 m (ce qui est inférieur à la valeur que nous avons admise). Ce faisant, la masse d'explosif requise pour creuser un cratère tel qu'admis est comprise entre 2.4 kg et 5.2 kg de TNT. Ce résultat est comparable à notre valeur ($1.7 \text{ kg TNT} \leq W \leq 7.0 \text{ kg TNT}$).

7.2 Calcul basé sur les dégâts observés

Il existe une corrélation entre les dégâts provoqués par une explosion à une distance R donnée et la masse de l'explosif W ; cette relation, basée sur le diagramme dit " $P^* - I$ " (pression/impulsion spécifique), s'écrit

$$R = \frac{k \sqrt[3]{W}}{\sqrt[6]{1 + (3175/W)^2}} ,$$

où k est un paramètre de dommage. Cette méthode est équivalente à notre estimation proposée au § 5.4. Sur cette base, les experts du *Sicherheitsinstitut* suggèrent qu'une charge de TNT de l'ordre de 5 à 10 kg est nécessaire pour provoquer les dégâts observés sur le toit du bâtiment. Cette masse est plus élevée que celle que nous avons obtenue par une méthode analogue ($0.9 \text{ kg TNT} \leq W \leq 3.5 \text{ kg TNT}$).

7.3 Estimation de la surpression

La cohérence des résultats obtenus est contrôlée en fonction des valeurs admises entre surpression et dégâts. Les valeurs retenues par les experts du *Sicherheitsinstitut* (*Swissi*) sont mises, ci-dessous, en regard des valeurs que nous avons utilisées aux § 5.2 et § 5.4 (voir aussi Annexe D).

Dégâts observés	Surpressions critiques estimées	
	<i>Swissi</i>	Ce rapport (§ 5.2 et § 5.4)
Bris de verre	15 mb	7 mb – 70 mb
Dégâts limités	70 mb	70 mb – 140 mb
Dommages structurels	140 mb	–

Les experts du *Sicherheitsinstitut* concluent (sans donner le détail de leurs calculs) que les dégâts observés sont compatibles avec ceux provoqués par l'explosion d'une charge de TNT de 2.4 kg à 5.2 kg.

^{||}Selon notre expérience, cette relation surestime légèrement la masse de l'explosif lorsque le sol est meuble.

7.4 Conclusion du *Sicherheitsinstitut* et comparaison avec nos valeurs

A partir de ce qui précède, les experts du *Sicherheitsinstitut* suggèrent que l'incident du 7 juillet 2010 est comparable à l'explosion d'une masse de TNT comprise entre 2.4 kg et 10 kg. Sur la base d'essais en laboratoire, ils estiment que la masse M de matière ayant réagi lors de l'événement étudié est de l'ordre de 3 kg à 50 kg.

Ces résultats sont condensés ci-dessous et comparés aux valeurs que nous avons obtenues.

	Equivalent TNT de l'événement	Masse de matière ayant réagi
<i>Swissi</i>	2.4 kg TNT $\leq W \leq$ 10 kg TNT	3 kg $\leq M_{\text{eff}} \leq$ 50 kg
Ce rapport	2 kg TNT $\leq W \leq$ 7 kg TNT	8 kg $\leq M_{\text{eff}} \leq$ 30 kg

Les masses estimées W de TNT obtenues par les experts du *Sicherheitsinstitut* ainsi que celles de la masse effective M_{eff} concordent de manière très satisfaisante avec nos estimations.

Pour dimensionner les mesures de protection, il convient d'adopter la valeur supérieure des estimations obtenues. On admettra donc qu'il faut protéger le personnel et les installations des effets d'une explosion de 10 kg de TNT.

L'explosion majeure correspond à la réaction de 10 kg de TNT.

8 Conséquences : amélioration des mesures de sécurité

Les mesures de sécurité supplémentaires devant être mises en place ne font pas l'objet de ce rapport et devront être proposées par *bci Betriebs-AG*.

Pour mémoire, quelques adaptations augmentant la sécurité du travail dans la halle de la décharge de Bonfol sont énoncées ci-dessous et sur la page suivante; certaines d'entre elles ont, à ce jour, déjà fait l'objet de discussion entre les représentants de la *bci Betriebs-AG* et ceux de la République et Canton du Jura (des mesures concrètes ne sont cependant pas encore disponibles). On suggère entre autre

- de réduire autant que possible la présence de personnel dans la halle d'excavation
- d'améliorer la protection du personnel travaillant autour de la halle d'excavation (pose de vitres blindées résistant au feu, à une surpression et aux projectiles)
- de prévenir l'ouverture inopinée des portes de la halle d'excavation (système de verrouillage des portes résistant à une explosion)
- de broyer les déchets afin d'initier sciemment les réactions violentes dans la halle même
- de maintenir les déchets humides (pour éviter la cristallisation des substances solubles potentiellement dangereuses).

Le travail au grappin peut être poursuivi sans mesure autre que le blindage des vitres de la salle de commande et la prévention de l'ouverture intempestive des portes de la halle. Lorsque le grappin prélève des déchets au voisinage des parois (disons, à moins de 15 m de celle-ci**), il faudra travailler de manière "douce" (réduction des chocs et frottements) et prévoir un remplissage partiel du grappin afin de diminuer la masse de matériau pouvant éventuellement réagir.

Il faut garantir que les matériaux qui sortent de la halle sont **inertes**, par exemple, en les concassant dans la halle (avant d'être incinérés, ces déchets seront de toute façon broyés; on économise ainsi des frais de traitement ultérieurs en les effectuant à la source).

**A 15 m, la surpression incidente due à l'explosion de 10 kg de TNT atteint 160 mb et la surpression réfléchie 340 mb.



Figure 4: (a) Pelleteuse équipée d'un godet concasseur. (b) Godet broyeur. (c) Pelle mécanique avec bras à longue portée (sur cette image, portée maximale 19.6 m).

Quelques mesures de sécurité envisageables

Etape	Empêcher l'explosion ou réduire ses effets	Provoquer l'explosion	Exemple
Avant la prise de déchets	Désensibiliser (humidifier)		
	Aération (évt. noyer avec N ₂)		
		Broyer ou concasser	Engin avec godet broyeur ou concasseur et cabine protégée (figure 4)
		Frapper	Engin télécommandé <i>Digger</i> (figure 5)
A la prise de déchets	Pelleteuse à longue portée		Bras <i>Caterpillar</i> (portée 15–20 m ; figure 4)
	Système "anti-explosion" sur le godet		Système <i>Kidde-Deugra</i> (basé sur le Halon ou le SF6)
	Protection balistique		Pelleteuse avec cabine protégée (figure 6)
	Télécommande		
Avant la sortie de la halle		Broyer ou concasser	Broyeurs <i>UNTHA</i> de métaux ou de matières dangereuses ; idée: broyeur immergé (protection contre les projectiles et étouffement de l'explosion)
Après la sortie de la halle	Maintenir les déchets humides		
Toutes	Salle de commande : vitrage blindé dans cadres renforcés.		
Toutes	Formation du personnel : sensibilisation aux phénomènes explosifs.		

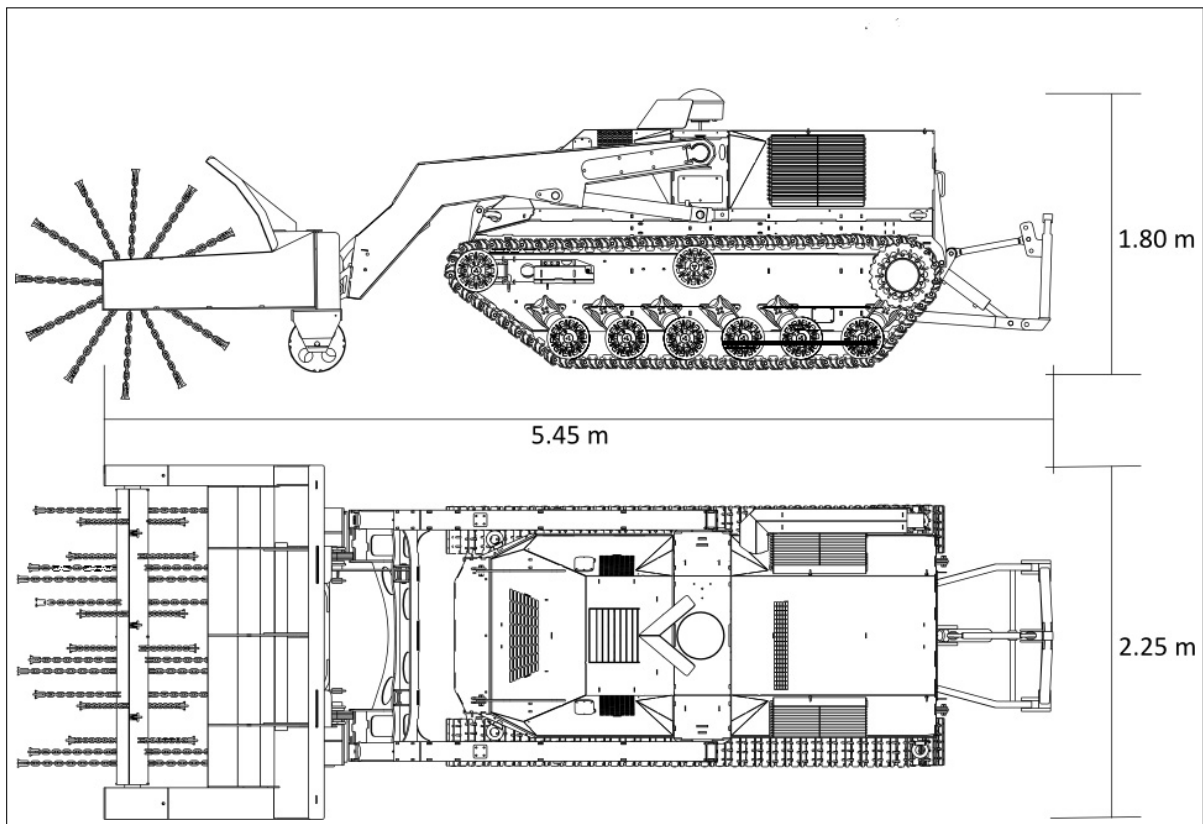


Figure 5: Engin de déminage télécommandé *Digger D-2*.



Figure 6: En haut, à gauche, vue générale de la pelleuse modifiée pour le travail dans des terrains contenant des munitions non explosées; le blindage de la cabine est certifié contre l'explosion d'obus d'artillerie de 15.5 cm. En haut, à droite, vue de la cabine pressurisée; sur l'avant, la cabine est protégée par un vitrage blindé triple; sur les côtés et l'arrière de la cabine, le vitrage est également blindé. Le plancher de la cabine est renforcé par une plaque d'acier. Ligne du milieu: à gauche, la lame avant relevée; à droite, la lame avant abaissée, avec une plaque de protection contre les éclats. En bas à gauche, vue du vitrage blindé triple sur l'avant de la cabine. En bas à droite, quelques munitions (principalement des obus de 8.1 cm) non explosées déterrées avec cet machine le jour où ces photographies ont été faites.

A Dimension de cratères d'explosion

La figure 7^{††} relie la masse W [kg TNT] de la charge explosive, la profondeur d'enfouissement S [m] de celle-ci dans un sol lâche (sable, terre) et le rayon R [m] du cratère. Pour une charge en surface ($S = 0$), on a

$$\frac{R}{W^{7/24}} = 0.85 \quad \text{ou} \quad W = 1.75 R^{24/7} .$$

En remplaçant dans l'expression précédente le rayon R du cratère par son diamètre D , on trouve

$$W = 0.16 D^{24/7} .$$

La charge à l'origine d'un cratère de diamètre compris entre 2 m et 3 m a une masse W dans l'intervalle

$$1.7 \text{ kg} \leq W \leq 7 \text{ kg} .$$

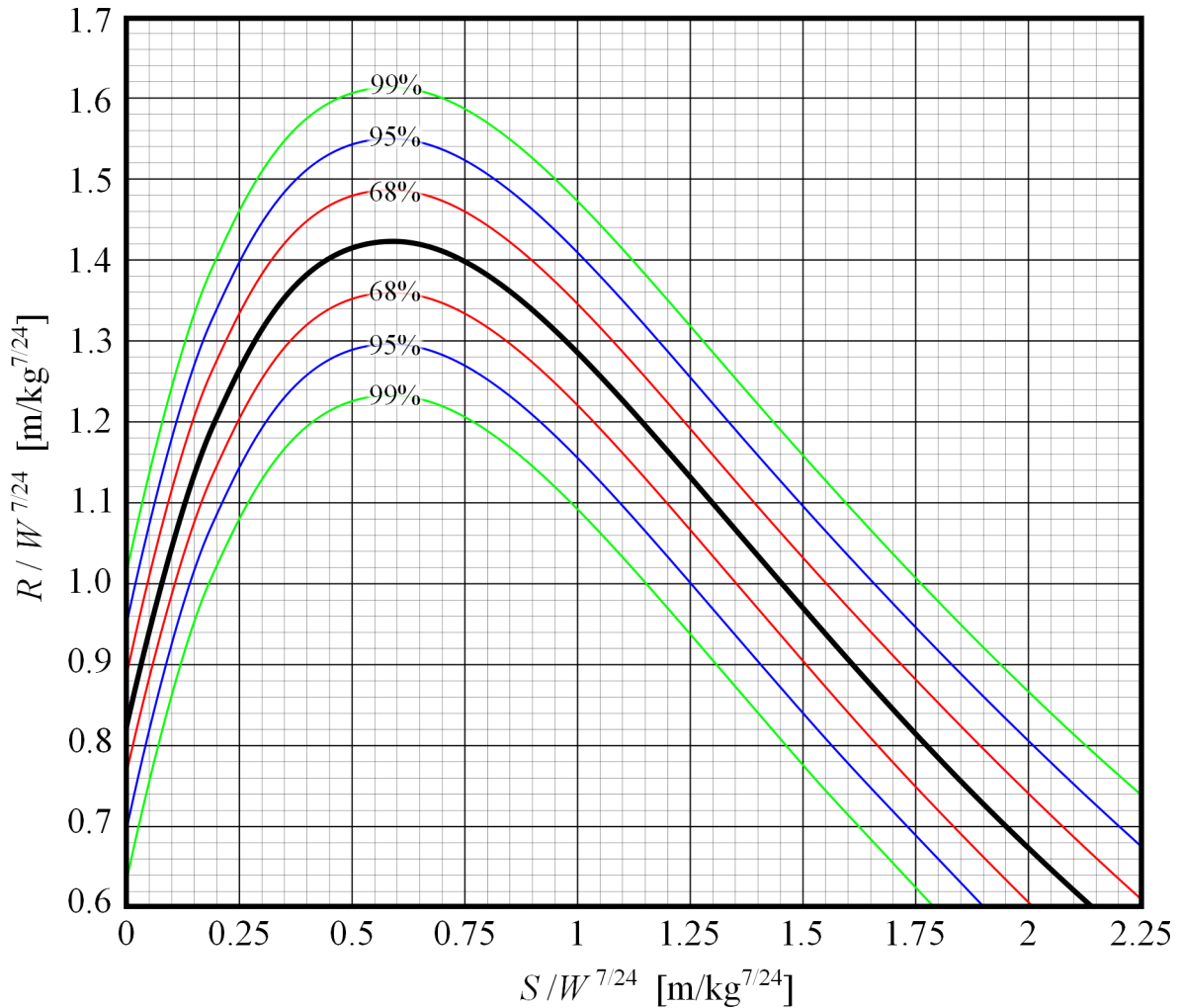


Figure 7: Rayon R du cratère creusé lors de l'explosion d'une charge de TNT de masse W , enfouie à la profondeur S . La figure donne le rayon relatif $R/W^{7/24}$ du cratère en fonction de l'enfouissement relatif $S/W^{7/24}$ de la charge. La courbe expérimentale (ligne noire) est entourée des limites entre lesquelles on retrouve 68%, 95% et 99% des valeurs observées.

^{††}La figure est extraite du rapport *Prédictions sur les dimensions des cratères d'origine explosive*, F. Ubertini, armasuisse, 27.09.2010.

B Surpression lors d'une explosion

Le graphique de la figure 8 donne la surpression relative maximale $\Delta p/p_0$ derrière une onde de choc produite par l'explosion d'une masse W [kg TNT] d'explosif à une distance R [m] donnée (figure d'après l'ouvrage *Explosive Shocks in Air*, G.F. Kinney et K.J. Graham, Springer Verlag, New York, 1985). Le graphique de la figure 8 est valable pour une charge en champ libre. Lorsque la charge est posée sur le sol (supposé indéformable), la masse de la charge effective W' est obtenue en divisant celle en champ libre W par 2; $W' = W/2$. Le tableau suivant donne quelques valeurs numériques utilisées dans le texte.

Surpression Δp [mbar]	$R/(2W')^{1/3}$ [m/kg ^{1/3}]	Distance R [m]	Charge W' [kg TNT]	Durée t_+ [ms]
35	24.7	30	0.89	3.9
70	13.3	5	0.03	1.1
140	7.8	15	3.50	4.8
150	7.5	5	0.15	1.7
400	4.2	5	0.82	2.1

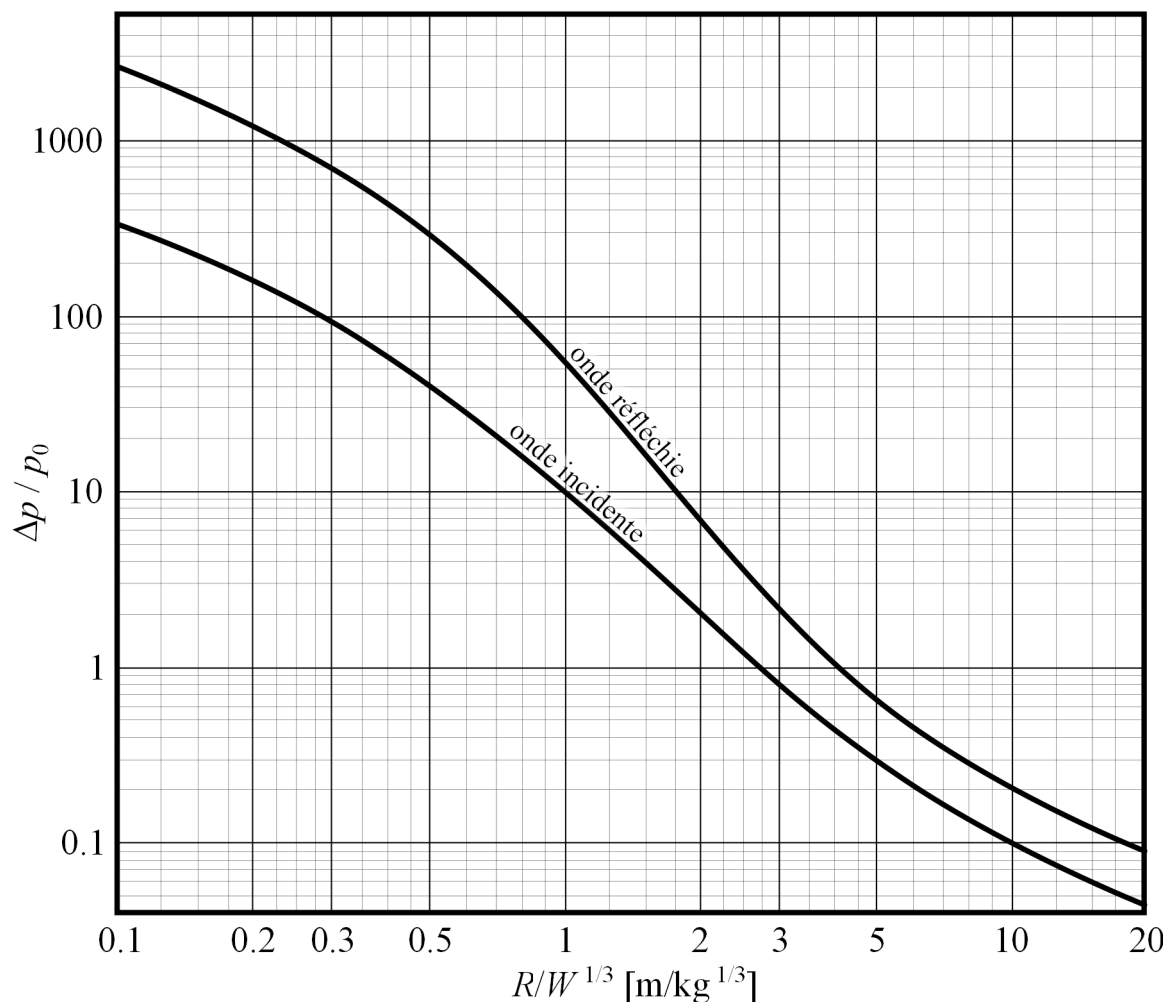


Figure 8: Surpression relative maximale $\Delta p/p_0$ derrière une onde de choc produite par une explosion en champ libre, en fonction de la distance réduite $R/W^{1/3}$. On a représenté les surpressions relatives maximales dans l'onde de choc directe et dans l'onde réfléchie par une surface normale à la direction de propagation. Δp [bar] est la pression de pic dans l'onde de choc et p_0 [bar] la pression ambiante (au niveau de la mer, en atmosphère standard, $p_0 = 1.013$ [bar]); R [m] représente la distance entre la charge et le point d'observation et W [kg TNT] est la masse de l'explosif.

C Intensité sonore

Diagramme de Pfander reliant l'intensité sonore (ou la surpression) maximale admissible pour éviter des problèmes auditifs, en fonction de la durée d'action du bruit. Le tableau suivant donne les estimations des charges libres $W'^{\ddagger\ddagger}$ requises pour atteindre la limite avec une protection auditive de 40 dB.

Durée t_W [ms]	Intensité I [dB]	Surpression Δp [mbar]	Distance R [m]	$R/(2W')^{1/3}$ [m/kg ^{1/3}]	Masse W' [kg TNT]
30	185	350	5	4.5	0.67
300	175	100	5	10.0	0.06

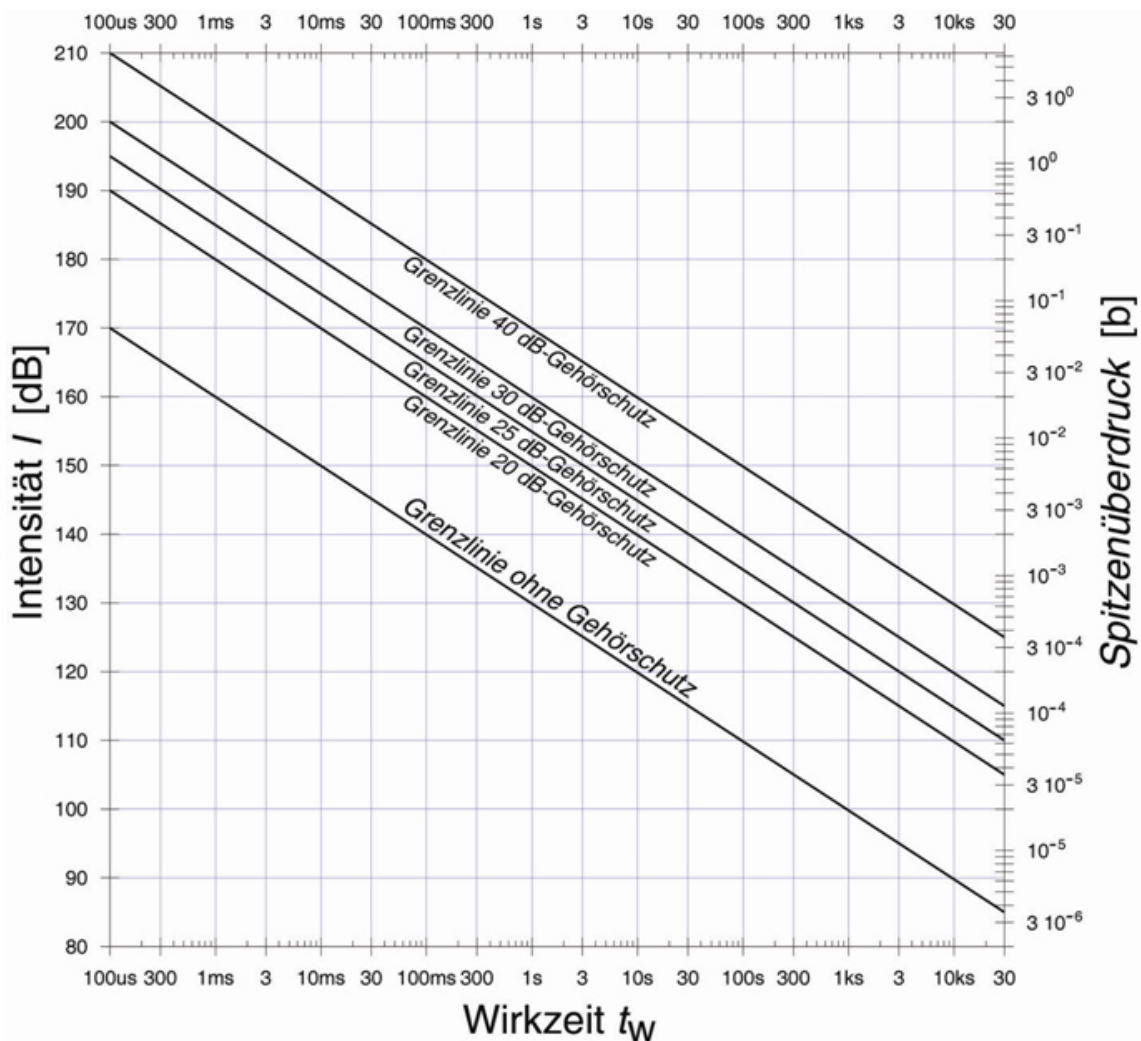


Figure 9: Diagramme de Pfander donnant l'intensité sonore I [dB] maximale admissible d'un bruit en fonction de sa durée t_W et de la protection auditive disponible.

^{‡‡}On tient compte de la remarque faite dans l'annexe B qu'une charge au sol W' produit la même surpression qu'une charge libre W si $W' = W/2$.

D Effet d'une onde de choc sur les bâtiments

Surpression [b]	Conséquences
0.001	Emission sonore à basse fréquence (10–15 Hz), niveau d'intensité sonore jusqu'à 137 dB.
0.002	Bris de vitres de grandes dimensions possible.
0.003	Niveau d'intensité sonore de 143 dB ; éventuel bris de vitres lors du passage du mur du son par un avion à réaction.
0.007	Bris de vitres de faibles dimensions possible.
0.01	Valeur standard pour le bris de vitre.
0.02	<i>Valeur limite</i> : pas de dégâts sérieux à un bâtiment, avec probabilité 0.95 . Légers dégâts aux toitures (tuiles, pannes). 1–10 % des vitres brisées.
0.03	Dommages structurels faibles et limités.
0.035–0.07	Bris de petites et grandes surfaces vitrées. Probables dégâts aux cadres de fenêtres.
0.05	Faibles dégâts structurels aux maisons.
0.06	99 % des vitres brisées. Légers dégâts structurels aux édifices.
0.07	Destruction partielle de maisons qui deviennent inhabitables (risque d'effondrement).
0.07–0.14	Bris de panneaux ondulés en Eternit. Défaillance des points d'attache de panneaux de tôle ondulée.
0.09	Légers dommages à la charpente métallique d'immeubles (déformation).
0.10	Effondrement de structures légères.
0.14	Effondrement probable des murs et des toits de maisons.
0.14–0.21	Destruction de murs en brique silico-calcaire et de parois en béton non armé.
0.16	<i>Limite inférieure</i> pour des dommages structurels importants.
0.17	Destruction de 50 % de la maçonnerie d'une maison.
0.21	Dommages légers à des machines (1.5 t) à l'intérieur d'édifices. Structure métallique d'édifices déformées et arrachées de leurs fondations. Dommages structurels aux édifices.
0.21–0.28	Destruction d'édifices légers (sans structure métallique). Fissuration de réservoirs d'huile minérale vides.
0.28	Rupture du coffrage de constructions légères.
0.30	Sérieux dégâts aux bâtiments (effondrement).
0.34	Mâts de bois abattus. Légers dommages aux machines (2.0 t) à l'intérieur d'édifices.
0.34–0.41	Destruction totale de maisons ; des murs de béton armé cèdent. Dégâts structurels importants aux édifices.
0.48	Wagons de marchandise chargés renversés.
0.48–0.55	Rupture de murs de 20 à 30 cm d'épaisseur par suite des forces de cisaillement et de torsion. Rupture de ponts tubulaires (rupture de conduites).
0.62	Destruction totale de wagons de marchandise chargés.
0.7	Destruction d'édifices industriels. Dommages importants aux machines (3.5 t) à l'intérieur d'édifices.

Table 1: Estimation des dommages provoqués par une onde de choc.