



HAL
open science

Etude de la surpression aérienne générée par un tir

Jean-Jacques Leblond

► **To cite this version:**

| Jean-Jacques Leblond. Etude de la surpression aérienne générée par un tir. 2013. hal-00845999

HAL Id: hal-00845999

<https://hal.science/hal-00845999>

Submitted on 18 Jul 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SOMMAIRE

1 – PRESENTATION	2
2 – ETUDE DE LA SURPRESSION AERIENNE GENEREE PAR UN TIR.....	3
2-1 – Origine et description physique du phénomène	3
2-1-1 Rappel des résultats précédents	3
2-1-2 Nouveaux résultats obtenus	6
2-2 – Propagation de l’onde de surpression aérienne	12
2-2-1 Rappel des résultats précédents	12
2-2-2 Nouveaux résultats obtenus	12
2-3 – Mesure de la surpression aérienne	17
2-3-1 Rappel des résultats précédents	17
2-3-2 Nouveaux résultats obtenus	18
3 – INFLUENCE DE LA TECHNIQUE ET DU DIMENSIONNEMENT DES TIRS	20
3-1 - Rappel des résultats précédents	20
3-2 – Nouveaux résultats obtenus	22
4 – EFFETS DES SURPRESSIONS AÉRIENNES	24
4-1 - Rappel des résultats précédents	24
4-2 – Nouveaux résultats obtenus	25
4-2-1- Effets sur les structures.....	25
4-2-2- Effets sur les personnes	32
5 – APPROCHE CONJOINTE VIBRATION-SURPRESSION	34
5-1 - Rappel des résultats précédents	34
5-2 – Nouveaux résultats obtenus	35

1– PRESENTATION

La surpression aérienne émise par les tirs de mine est un phénomène dont la mesure, synchrone avec celle des vibrations transmises par le sol, se généralise notamment pour les tirs en carrière, du fait essentiellement d'obligations réglementaires de respect de valeurs limite (arrêté du ministre de l'Environnement du 22 /09 /94 et circulaire d'application du 02/07/96.

Elle reste toutefois un phénomène mal connu et peu documenté, du fait probablement de sa grande variabilité en fonction de la géométrie des tirs, du mécanisme de l'abattage ou des conditions météorologiques qui complique la compréhension de ce phénomène et sa prédiction.

Partant du constat qu'un nombre croissant de plaintes de riverains émises lors de tirs de mine ne s'expliquait pas par les seules vibrations transmises par le sol, Nous avons engagé depuis 1996 des travaux sur cette surpression aérienne et ses effets, dans le cadre de la recherche LCPC.

Ces premiers travaux, associant une recherche bibliographique et l'analyse d'un échantillon relativement réduit de données acquises lors de mesures opérationnelles, ont permis d'apporter des premiers éléments de connaissance sur ce phénomène et soulevé également de nouvelles questions. Ces résultats sont décrits dans un rapport du 4 novembre 2002 intitulé « Analyse des surpressions aériennes générées par les tirs de mine » et répertorié CT 23-FICHE 2-23-52-00.

Depuis ces travaux ont été poursuivis dans le cadre de l'opération de recherche LCPC « réduire les vibrations en ville » et répertorié 11M071 afin d'en préciser les résultats à partir :

- D'une bibliographie enrichie de nouvelles publications concernant les infrasons et leurs effets sur l'homme ainsi que les risques liés aux explosions (volet surpression aérienne des plans de prévention des risques technologiques PPRT).
- D'un échantillon de données opérationnelles plus large enrichi par des mesures réalisées spécifiquement dans le cadre de cette recherche sur des bâtiments destinés à être démolis et pouvant être sollicités à forte énergie, sur le site de la carrière de Cressy sur Somme (71).

Ce document synthétise les résultats de ces travaux suivant un plan identique à celui du rapport précité de 2002, chaque chapitre débutant par un résumé des conclusions de ces travaux antérieurs.

2 – ETUDE DE LA SURPRESSION AERIENNE GENEREE PAR UN TIR

2-1 – Origine et description physique du phénomène

2-1-1 Rappel des résultats précédents

La surpression aérienne générée par un tir de mine a pour origine la détente des gaz produit par l'explosion d'une charge dans le milieu qui l'entoure.

Cette surpression affecte d'abord les parois du forage puis le matériau à fragmenter et émerge dans l'atmosphère.

Les vitesses de détonation initiales des explosifs de travaux publics se situent entre 3000 et 6000 m/s et les pressions atteintes au niveau de la charge varient de 3,5 à 15 Gigapascals. Le front d'onde de pression initiale est supersonique dans l'air comme dans la plupart des roches et provoque une onde de choc qui se propage dans le milieu encaissant.

L'onde de pression émergeant dans l'atmosphère a par contre des caractéristiques de vitesse de propagation et de pression dépendant de son trajet dans le massif à fragmenter, une part importante de l'énergie étant consommée en travail mécanique de fragmentation et de foisonnement du matériau (c'est d'ailleurs là que réside l'objectif du tir).

Chaque charge d'un tir produit un front d'onde affecté par son trajet dans le massif puis émergeant dans l'atmosphère avec ses caractéristiques propres de pression et de vitesse, suivant une chronologie dépendant de la séquence de mise à feu des charges.

Le déplacement des matériaux abattus provoque également une onde de surpression aérienne dépendant du volume en mouvement et de sa vitesse de déplacement, un front de taille de carrière en cours d'abattage pouvant être comparé à la membrane d'une enceinte acoustique de 1000 m² se déplaçant d'une vingtaine de mètres à une vitesse de quelques dizaines de m/s

L'onde de surpression aérienne résultante à quelques mètres d'un tir est un signal complexe issu de la combinaison des différents signaux unitaires décrits ci-dessus.

Au-delà de quelques mètres d'une charge, le front d'onde se propage à une vitesse égale à la vitesse du son dans l'air, suivant un modèle proche de celui d'une onde sphérique de grande puissance. L'augmentation de la pression au niveau du front d'onde provoque une densification de l'air dans une couronne étroite située immédiatement à l'arrière de ce front comme illustré sur la figure 1 ci-dessous. Cette augmentation de masse volumique correspond à une concentration des molécules de gaz provoquant à l'arrière du front une zone de dépression, la masse de gaz au sein de la sphère étant constante.

L'enregistrement temporel de la figure 2 illustre la signature type de ce signal correspondant à une compression initiale suivie d'une zone de dépression.

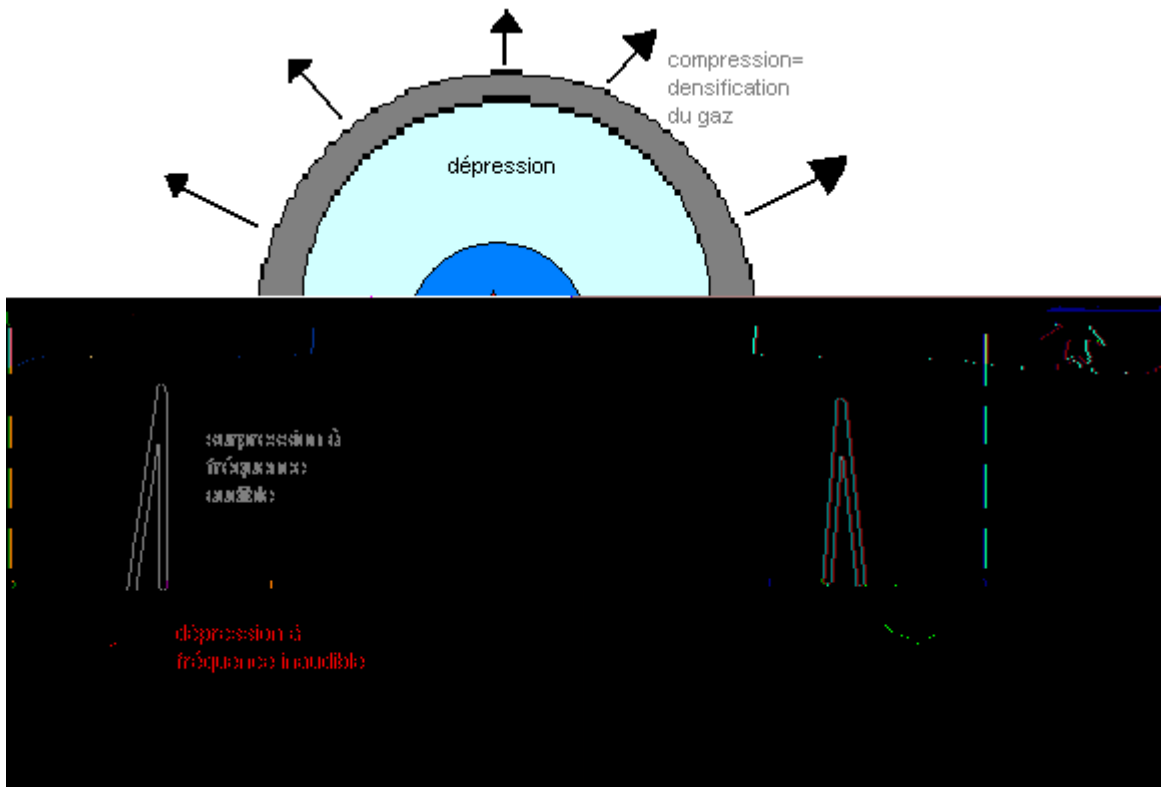


Figure 1 : variation des pressions entre le front d'onde de surpression en cours de propagation une charge émettrice ponctuelle.

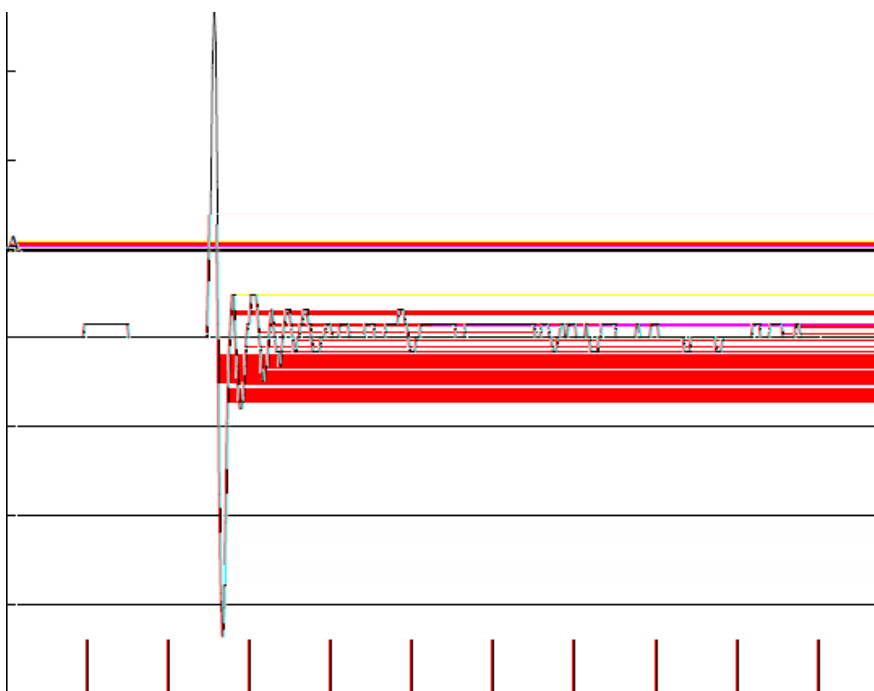


Figure2 : signal temporel type de la surpression aérienne associée à une charge d'explosif isolée.

En présence de plusieurs charges dont les dates de mise à feu sont séparées de quelques millisecondes, correspondant au cas général des tirs de mine en génie civil, le signal temporel de l'onde de surpression aérienne, illustré par la figure 3, présente :

- Une première série d'oscillations à hautes fréquences et faibles amplitudes qui n'appartient pas à l'onde de surpression aérienne mais correspond à la vibration du microphone au passage des vibrations transmises par le sol, plus rapide que les ondes aériennes ;
- Une phase initiale constituée d'une série d'oscillations à fréquences relativement élevées correspondant aux signaux issus de la détente des gaz des différents trous (en rouge sur la figure 3) ;
- D'une seconde phase à basses fréquences, correspondant au déplacement des matériaux et à la phase de dépression finale (en vert sur la figure 3). En fonction de la séquence de tir cette seconde phase peut se combiner avec la première

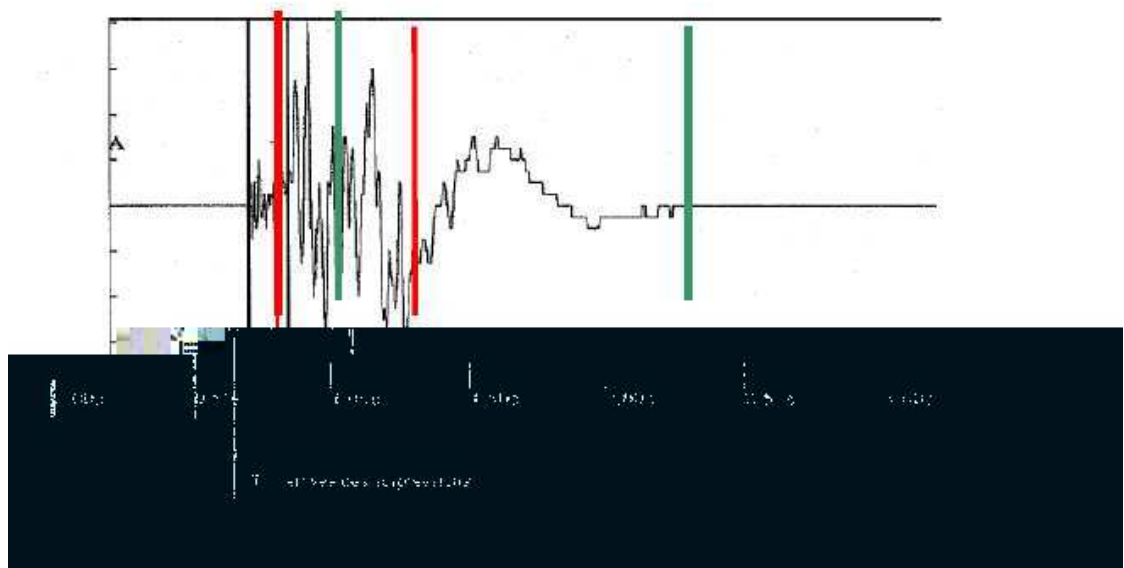
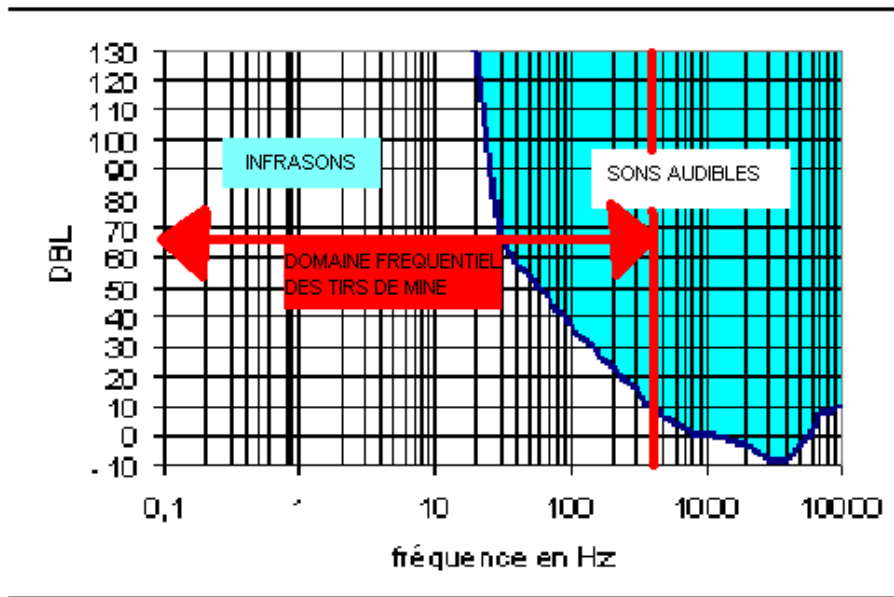


Figure 3 : signal temporel type de l'onde de surpression associée à un tir d'abattage

En terme de fréquence, la plage couverte par ces phénomènes se situe entre 1 et 400 Hz soit dans le domaine des basses fréquences audibles et des infrasons, inaudibles par l'oreille humaine comme illustré sur la figure 4 ci dessous.



Limite inférieure d'audibilité d'après Fletcher et Munson

Figure 4 : position de la gamme de fréquence associée aux surpressions aériennes émises par un tir vis à vis de la courbe moyenne d'audition humaine

Les charges déconfinées ou proches de la surface correspondent aux fréquences les plus élevées, les fréquences les plus basses, inaudibles, correspondent au déplacement des matériaux et à la phase finale des signaux comme l'illustre la figure 3.

2-1-2 Nouveaux résultats obtenus

Les constats réalisés sur site montrent que la valeur maximale de l'onde de surpression n'est pas le seul facteur agissant sur leurs effets sur les structures et les personnes. La forme du signal, sa durée et son contenu fréquentiel influent également sur ses effets potentiels. Nous avons fait ces constats à partir de l'analyse des réactions de riverains exposés aux effets de tirs.

Le guide « PPRT- Complément technique relatif à l'effet de surpression » rédigé en 2007 par le CSTB apporte une explication technique partielle à ces constats. Ce guide concerne les effets des surpressions aériennes provoquées par une explosion accidentelle à forte énergie dans un but de préservation des populations environnantes. Les phénomènes étudiés sont dans une gamme d'énergie beaucoup plus haute que ceux concernant les tirs de mine, mais les principes d'émission et de propagation des ondes de surpression demeurent identiques.

Ce guide distingue deux types d'explosion associés à deux formes d'ondes distinctes :

- **La déflagration** qui correspond à une explosion de violence modérée dont les effets de surpression sont représentés sur la figure 5 ci dessous, extraite de ce guide.

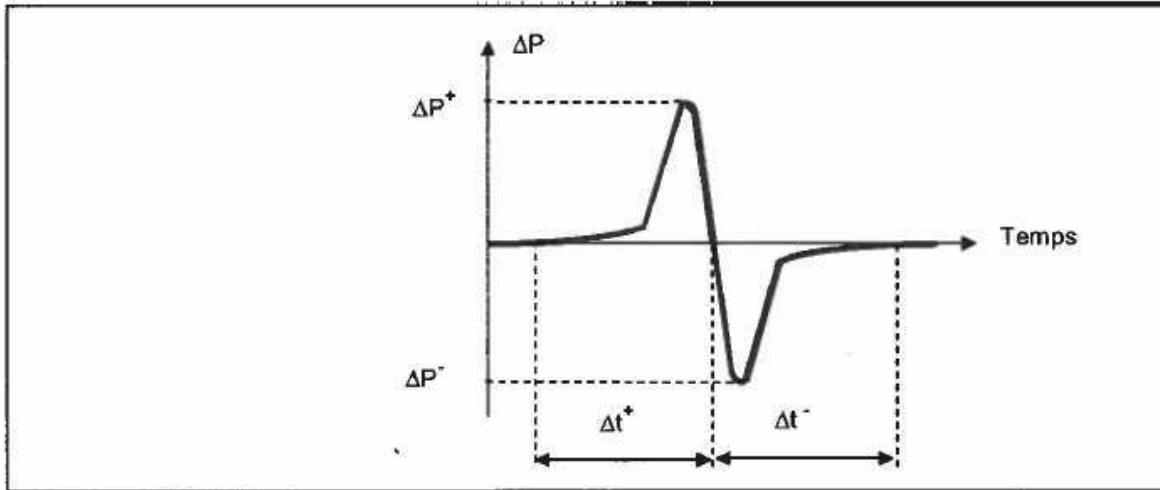


Figure 5 : Onde de pression engendrée par une déflagration selon guide PPRT-CSTB 2007.

Ce signal se caractérise par une montée en pression quasi identique à leur décroissance, les phases de surpression et de dépression étant quasi identiques en terme d'amplitude comme de fréquence. Ce type d'onde présente les effets les plus nocifs pour les structures, du fait notamment de la variation des pressions crête/crête.

- **La détonation** qui correspond à une explosion violente dont les effets de surpression sont représentés sur la figure 6 ci dessous, extraite du même guide.

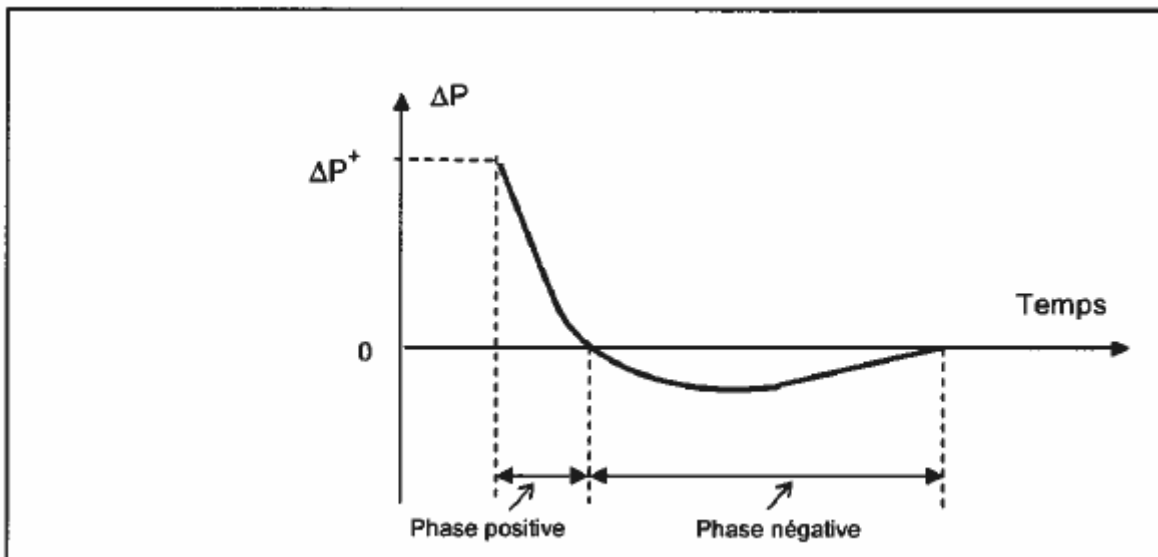


Figure 6 : Onde de pression engendrée par une détonation selon guide PPRT-CSTB 2007.

Ce type d'onde se caractérise par une montée en pression très rapide et une décroissance plus lente se poursuivant par une phase de dépression à amplitude et fréquences plus basses. Ce type d'onde présente une nocivité plus faible proportionnelle à sa phase positive, l'énergie transmise en dépression étant nettement plus faible.

En fonction du confinement des charges d'explosifs, du nombre de surfaces libres, de l'interaction rocher-explosif et du volume de matériaux mis en mouvement, les tirs de mine sont susceptibles de produire des ondes de surpression correspondant à chacun de ces types ou une combinaison de ces deux modèles, leur particularité étant de présenter une série d'explosions à intervalles très brefs, cas non traité dans le guide PPRT.

Les appellations « déflagration » et « détonation » utilisées correspondent à une propriété de la dynamique de la réaction chimique à l'origine de l'explosion :

- La déflagration caractérise une réaction chimique se propageant dans le produit explosif à une vitesse comprise entre la vitesse du son dans l'air et la vitesse de propagation d'une onde de choc dans le dit produit ;
- La détonation caractérise une réaction chimique se propageant dans le produit explosif à une vitesse supérieure à celle de propagation d'une onde de choc dans le dit produit.

L'utilisation de ces termes dans le guide PPRT est justifiée du fait que les explosions accidentelles traitées sont généralement peu ou pas confinées, la vitesse de réaction du produit étant très proches voire égale à la vitesse d'émission de l'onde de surpression dans l'atmosphère.

En matière de tirs de mine, l'immense majorité des explosifs utilisés sont détonants, seule la poudre noire, d'utilisation très marginale aujourd'hui est un explosif déflagrant.

Pourtant on constate que l'allure générale la plus fréquente des signaux de surpression enregistrés est celle de la déflagration.

Ceci tient au fait que les explosifs mis en œuvre dans les tirs sont confinés dans le massif rocheux, ce confinement étant complété par le bourrage mis en œuvre en partie sommitale des trous. Les explosifs se décomposent, sauf dysfonctionnement, selon un régime de détonation, mais le confinement ralentit la vitesse d'émission de ces gaz dans l'atmosphère, l'onde de surpression émergeant dans l'air présentant une montée en pression plus lente l'apparentant à un signal de type déflagration.

La combinaison des ondes de surpressions provenant de chacun des trous tend également à lisser les pics du signal. Enfin le déplacement des matériaux est un phénomène beaucoup plus lent qui s'ajoute aux précédents pour définir une la forme du signal résultant de type déflagration.

L'analogie dans les appellations déflagration et détonation entre les régimes de décomposition des explosifs et les formes des signaux de surpression est trompeuse, les explosifs détonants confinés pouvant générer des ondes de surpression de type déflagration.

Il existe donc, dès l'origine du phénomène, deux types de signaux de surpression de nocivité différente en fonction des temps de montée en pression et de

l'intensité de l'onde de dépression. C'est essentiellement le confinement des charges qui va définir l'allure du signal.

Les tirs confinés, de type tir en gradin ou tir « cratère » classiques en travaux publics, génèrent des ondes de surpression de type déflagration en fonctionnement normal, comme illustré sur la figure 7 ci dessous

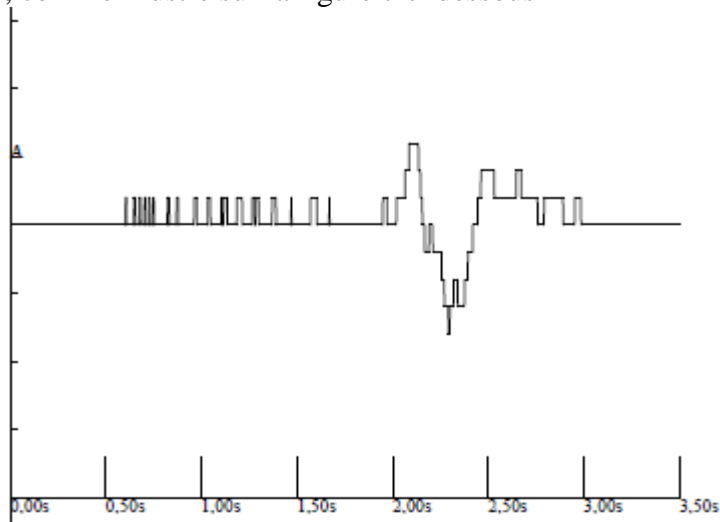


Figure 7 :Exemple de signal type déflagration associé à un tir confiné.

Les tirs de découpage, de pétardage, de relevage, peu confinés émettent un signal de type détonation qui se caractérise par des surpressions souvent très élevées mais moins nocives, à fréquences audibles, comme illustré sur les figures 8 et 9 ci dessous.

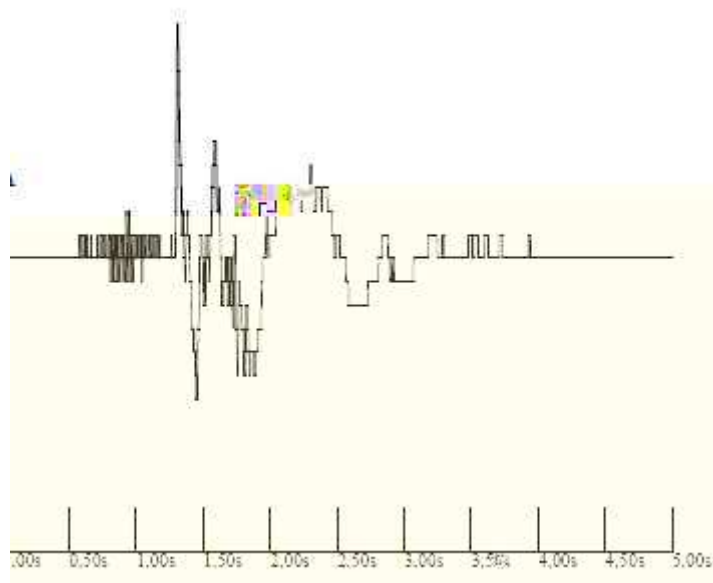


Figure 8 :. Exemple de signal type détonation associé à un tir déconfiné



Figure 9 :. Tir de découpage provoquant l'émission de gaz à grande vitesse dans l'atmosphère matérialisée par les colonnes étroites des projections émanant de chaque trou.

Les tirs souterrains présentent, quant à eux, un type de signal particulier, illustré sur la figure 10, marqué par des pics de pression de type détonation associés à une composante à fréquence ,comprise généralement entre 3 et 6 Hz, initiée par la combinaison des signaux unitaires émis selon une séquence à intervalles longs. Les phénomènes complexes qui se produisent à l'intérieur du tunnel, en début de propagation, privilégient l'émergence de cette composante continue sur la durée de la séquence.

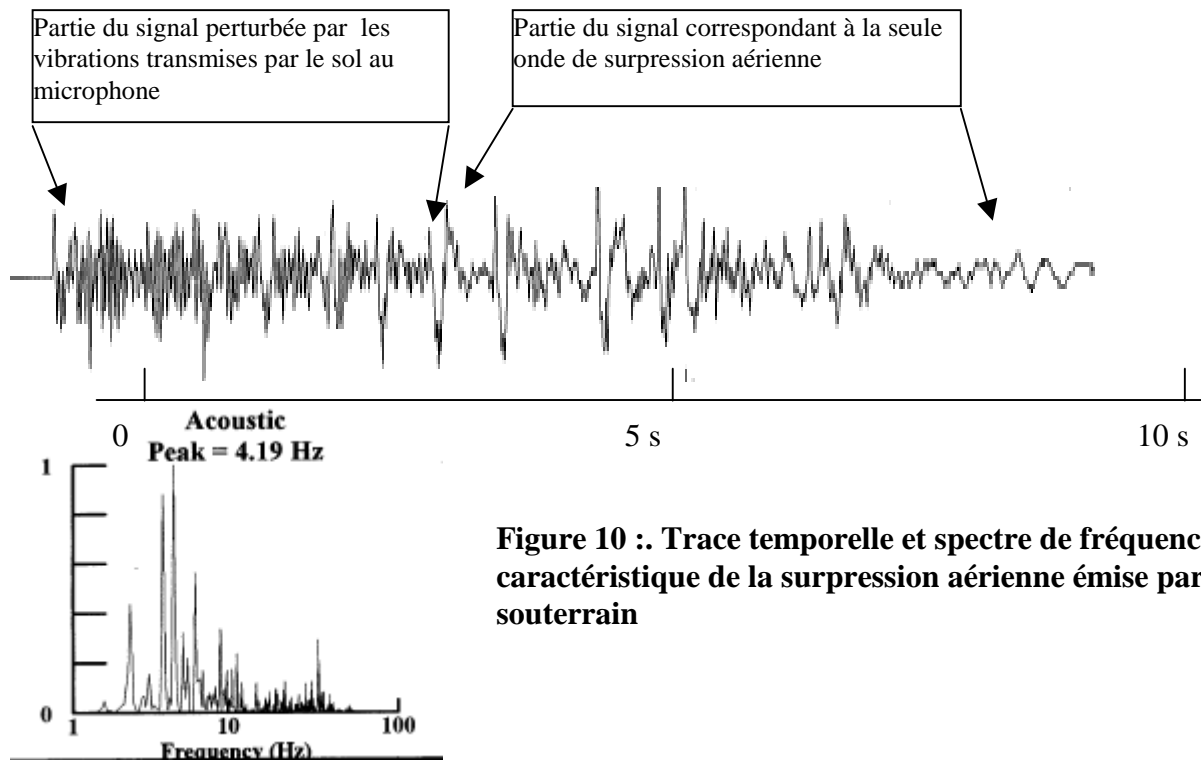


Figure 10 : Trace temporelle et spectre de fréquence associé caractéristique de la surpression aérienne émise par un tir souterrain

Enfin, certains tirs de masse de type déflagration présentent localement des pics à hautes fréquences correspondant à l'émergence au niveau d'un ou de plusieurs trous de gaz à grande vitesse liée soit à l'existence d'un point faible du massif (failles, fissures....) soit à la rupture brutale du bourrage (« effet canon ») comme illustré sur la figure 11. Le signal résultant doit alors être analysé en séparant les deux types de signature afin de ne pas affecter à la pression associée à la détonation la nocivité de la déflagration.



Fig 11 : tir affecté d'un « effet canon » au niveau d'un trou de la volée

2-2 – Propagation de l'onde de surpression aérienne

2-2-1 Rappel des résultats précédents

L'onde de surpression aérienne émise par un tir se propage dans l'air à la vitesse du son (340m/s). La pression crête décroît en fonction de la distance par expansion de la surface du front d'onde. La relation type pour décrire cette variation est de la forme :

$$P = K.(D/Q^{1/3})^{-1,2} \quad \text{avec :}$$

P : pression en Pa (Pascal) ;

D : distance entre le tir et le point de mesure en m ;

Q : charge unitaire d'explosif en Kg

K : constante dépendant du site et de la source déterminée expérimentalement.

Ces lois montrent une très grande variabilité du fait de la source (interaction rocher-explosif de chaque trou) et du nombre important de paramètres agissant sur la valeur de K :

- La morphologie du site et l'occupation des sol susceptibles de varier en fonction de l'avancement des tirs (proximité des talus et fronts, enfoncement dans le massif) ou de la saison (évolution saisonnière de la végétation et des cultures) ;
- L'orientation des surfaces libres vis à vis du point d'observation ;
- Les conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, gradient thermique, brouillard, pluie ou neige....).

En terme de fréquence, le spectre s'appauvrit et tend progressivement à se concentrer vers les fréquences les plus basses. Ce phénomène se traduit par une tonalité devenant de plus en plus grave de la partie audible de l'onde puis l'absence de bruit audible, la surpression étant entièrement dans le domaine des infrasons. La durée du signal tend également à croître avec la distance.

2-2-2 Nouveaux résultats obtenus

A partir de mesures réalisées sur différents sites, nous avons recherché à établir des lois de propagation selon le modèle général figurant dans le chapitre précédent. Il apparaît dans tous les cas une grande dispersion des mesures, voire une impossibilité de recalculer les mesures avec un modèle de ce type.

Ce modèle statistique est issu de l'analyse d'un échantillon de mesures important réalisée aux États-Unis sur des tirs de mines et carrières, à charges unitaires et totales d'explosif élevées, observés à grande distance. Dans cette configuration de tir, les explosifs sont relativement confinés et les volumes déplacés importants conduisant à des ondes de surpression à basses fréquences. L'éloignement des points d'observation conduit à lisser les éventuels pics de surpression associés à des dysfonctionnements ponctuels au niveau de trous isolés. Ce modèle est bien corrélé avec ce type de tir toutefois peu fréquent en France, la

densité du bâti créant des contraintes environnementales ne permettant que rarement des tirs de cette importance.

La première difficulté pour appliquer ce modèle réside dans la définition de la valeur de la charge d'explosif Q.

Pour les vibrations transmises par le sol, la charge Q, appelée « charge unitaire instantanée maximale » est calculée en additionnant la masse de toutes les charges détonant dans un intervalle de temps glissant de 8ms entre toutes les charges du tir et de 17ms entre charge voisine. Ce mode de calcul est défini dans le « guide sur la sécurité du tir séquentiel de 1997 ». Cette règle, parfois contestable notamment pour des mailles importantes, reste généralement satisfaisante car elle permet de garantir un intervalle de temps suffisant pour considérer que les valeurs maximales des vibrations émanant des différentes charges ne se cumulent pas.

Cette charge est calculée sur la base d'ondes sismiques se propageant à des vitesses de l'ordre 3000m/s dans un massif rocheux et qui parcourt donc environ 25m en 8ms.

Par analogie, il est tentant et fréquemment tenté d'utiliser cette même charge pour l'intégrer dans les modèles de propagation des surpressions. Or, compte tenu de leur vitesse de propagation dans l'air environ dix fois plus faible (340 m/s), l'intervalle de temps de 8ms ne permet pas de considérer que les signaux unitaires de chaque trou ne se cumulent pas, l'onde n'ayant parcouru qu'environ 2,70m, soit une distance à celle séparant les trous.

Il conviendrait donc de définir une règle propre au calcul de la charge unitaire instantanée maximale pour les surpressions, sauf à prouver que la charge n'est pas un paramètre déterminant dans l'étude de ces phénomènes et de leur maîtrise.

Dans les deux exemples qui suivent, c'est la charge par trou qui a été utilisée. Le premier exemple concerne le site de Cressy sur Somme sur lequel nous avons instrumenté un groupe de bâtiments sur 8 points de mesures en vibrations et 4 en surpression lors d'une vingtaine de tir. Ces tirs se situaient pour une moitié dans l'ancienne carrière distante de 350 m moyens, pour la seconde sur l'extension de la carrière distante de 40 à 100 m. Le résultats des mesures de surpression, tous capteurs confondus, sont reportés sur la figure 11 ci dessous.

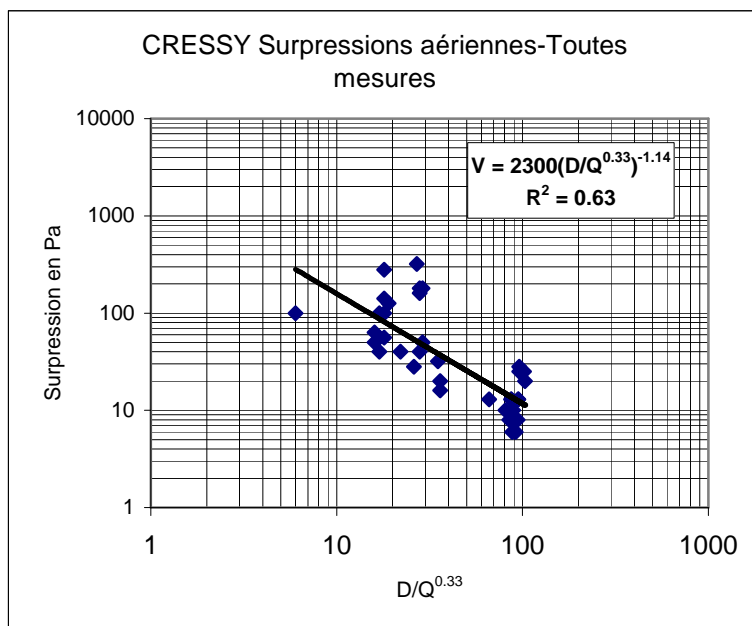


Figure 11 :. Variation des surpressions aériennes en fonction de la distance réduite par la racine cubique de la charge par trou sur 20 tirs de carrière et 4 points de mesure

La loi moyenne de propagation présente une pente d'atténuation en $-1,14$, proche de la pente de la loi type.

La dispersion des mesures est par contre importante, notamment pour les tirs proches :

- Pour les tirs de l'exploitation ancienne à 350 m, les surpressions maximales varient de 6 à Pa soit un rapport proche de 5 ;
- Pour les tirs de l'extension les surpressions varient de 16 à 320 Pa soit un rapport de 20.

Une partie de cette dispersion peut provenir de la présence de 4 points de mesure présentant des directions relatives vis à vis des tirs différents. Le traitement par point de mesure comme illustré pour 2 des sites sur la figure 12 ci dessous, n'améliore pas sensiblement la dispersion des points. La dispersion des mesures provient donc principalement du fonctionnement de la source et des conditions de propagation de l'onde.

Compte tenu de la puissance en 0,4 de la charge dans la formule type un doublement de cette charge se traduit par une augmentation de la surpression dans un rapport de 1,3 ; la multiplier par 20, ce qui revient en carrière sensiblement à remplacer la charge par trou par la charge totale, à augmenter la surpression dans un rapport de 3,3. La variation prévisible des surpressions liée à celle de la charge reste donc très inférieure à la dispersion des mesures provoquée par le fonctionnement du tir et les conditions de propagation pour des tirs de carrière réputés répétitif dans un massif rocheux sain et homogène.

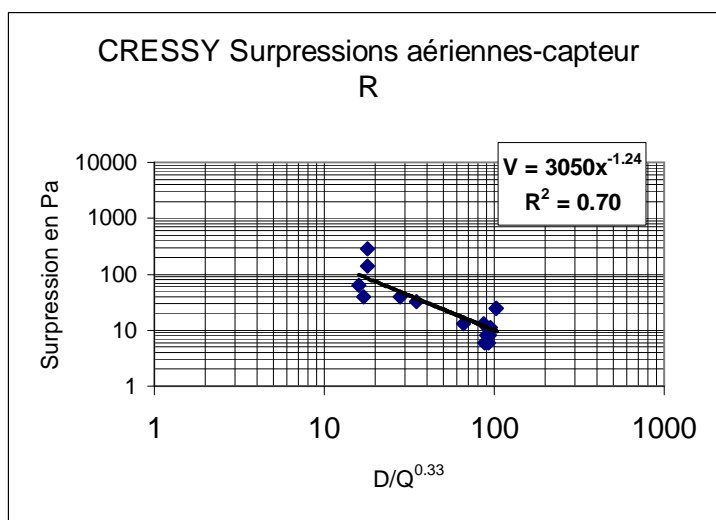
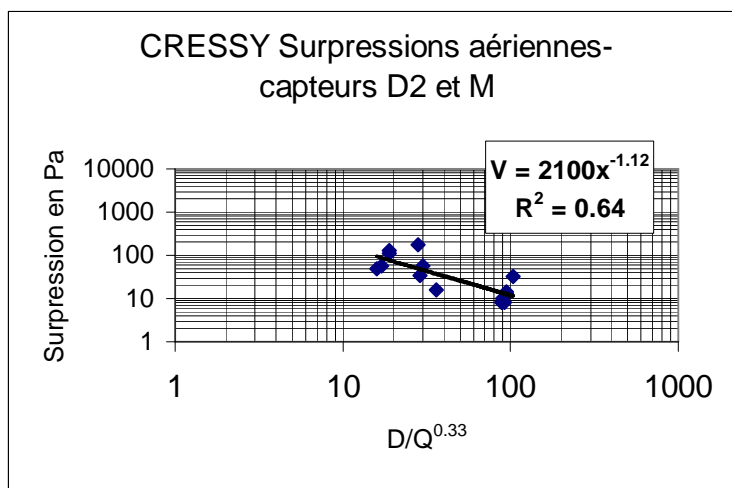


Figure 12 :. Variation des surpressions aériennes sur le même site par point de mesure

Le second exemple concerne la réalisation par minage des terrassements d'un parking souterrain en zone urbaine. Les mesures ont été réalisées lors de 125 tirs sur trois points de mesure distants de 4 à 120 m. La charge prise en compte est la charge par trou qui a varié de 0,5 à 4 Kg.

Les résultats reportés sur la figure 13 ci dessous indique une pente d'atténuation moyenne en 0,7 sans grande signification compte tenu de la très grande dispersion des mesures dépassant des rapports de 30 entre les valeurs extrêmes mesurées pour une même distance réduite par la racine cubique de la charge.

Ce second exemple illustre de manière encore plus nette, l'influence réduite de la charge prise en compte dans le modèle.

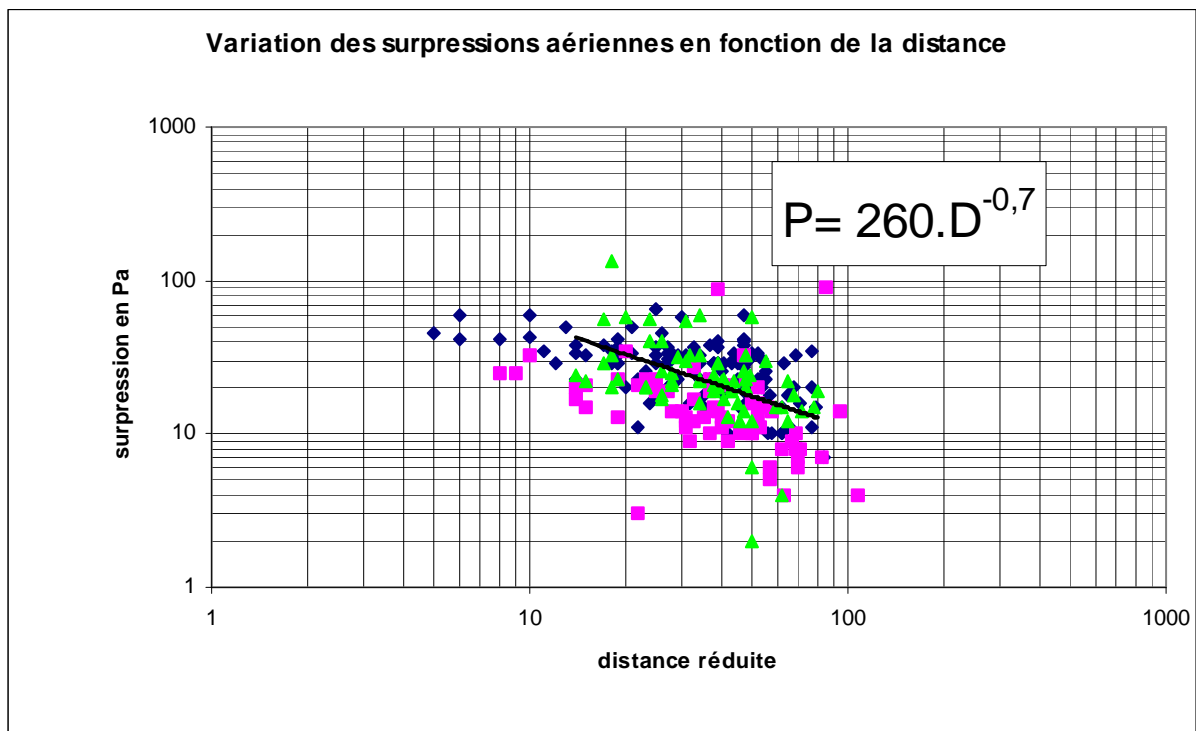


Figure 13 :. Variation des surpressions aériennes en fonction de la distance réduite sur 3 points de mesure et 125 tirs en site urbain.

Ces exemples montrent la difficulté d'établir des lois de propagation des surpressions aériennes fiables et donc de pouvoir disposer d'un outil fiable de prédiction de ces phénomènes.

Ces lois paraissent totalement inefficaces en tirs proches. Elles présentent moins de dispersion en tirs lointains, tout en restant plus un moyen de comparer entre-eux les effets des tirs à posteriori qu'un outil fiable de prévision.

S'il paraît difficile de prévoir les niveaux de surpression, il est par contre possible de définir les directions privilégiées dans lesquelles elles seront émises, ces phénomènes se caractérisant pour certaines techniques de tir par une directivité importante, qui peut être décrite en utilisant la loi type mais appliquée à plusieurs capteurs pour un même tir comme illustré sur la figure 14 ci dessous

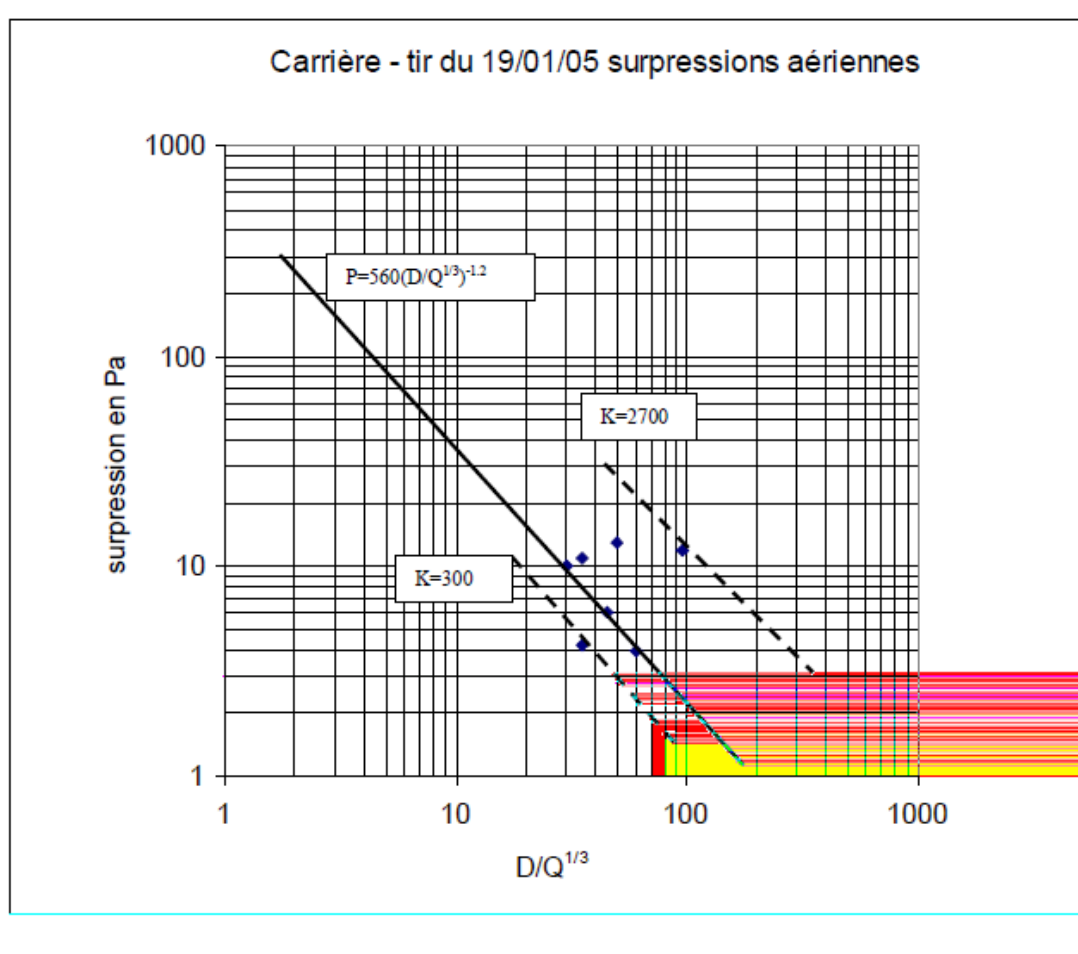


Figure 14 :. Variation des surpressions aériennes en fonction de l'orientation relative des points de mesure vis à vis du front de taille

Sur cet exemple concernant un tir d'abattage en gradin, les 7 microphones étaient répartis tout autour du tir à des distances variant de 300 à 600m. Les niveaux de surpression corrigés par la distance varient dans un rapport de 9 entre le microphone situé à l'arrière du tir ($K=300$) et celui face au front de taille ($K=2700$), les autres capteurs situés plus ou moins latéralement indiquant des surpressions intermédiaires.

Pour les tirs en gradin, généralisés en carrières, les surpressions sont très nettement maximales face au front de taille, et minimales à l'arrière du tir. Il est fréquent que les écarts entre ces points soit dans un rapport de 10 en Pa soit 20 dBL en échelle logarithmique, passant ainsi d'un niveau en limite de perception à des niveaux en limite du supportable pour un même tir.

Cette directivité de l'émission peut être amplifiée par la forme de l'excavation et des fronts de taille. En travaux publics les talus de déblai provoquent le même type de phénomène en privilégiant une propagation dans l'axe du déblai.

La directivité des tirs est encore plus marquée pour les tirs souterrains l'onde étant canalisée dans le tube, comme dans un canon de fusil, et émise dans l'axe de l'ouvrage. Les amplifications face à la tête peuvent atteindre des rapports proches de 30 en Pa soit environ de 30 dBL.

2-3 – Mesure de la surpression aérienne

2-3-1 Rappel des résultats précédents

L'unité de pression dans le système international est le Pascal (Pa) correspondant à 1 Newton par mètre-carré.

Dans la pratique, le millibar, égal à 101,3 Pa, est fréquemment utilisé, notamment dans la restitution des résultats fournie par les appareils de mesure.

S'agissant d'un phénomène proche de l'acoustique, l'unité la plus fréquemment utilisée est le décibel linéaire noté dBL défini par la formule :

$$P_{dB} = 20 \log (P/P_0) \quad \text{avec :}$$

- P_{dB} pression exprimée en décibel
- \log logarithmique décimal
- P pression exprimée en Pa
- P_0 pression de référence arbitraire fixée à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa , comme pour les différentes unités en dB pondéré utilisées en acoustiques et correspondant au seuil de pression audible d'un son pur de fréquence égale à 1000 Hz.

Il s'agit du décibel mathématique à ne pas confondre avec les unités utilisées en acoustique dBA, dBC...correspondant à des valeurs issues d'un traitement du signal comportant des pondérations fréquentielles.

Afin de limiter les risques de confusion cette unité est appelée dB linéaire et notée dBL. Dans cette unité, un doublement de la pression correspond à +6 dBL, une pression multipliée par 10 à + 20 dBL.

Le matériel de mesure utilisé pour les surpressions aériennes provoquées par les tirs de mine doit permettre, sur la plage de fréquence 1-400 Hz, de mesurer la variation dynamique de la pression de l'air sur une durée n'excédant pas 10 à 15 secondes dans une gamme de pression variant 1 à 500 Pa. Les appareils utilisés sont des microphones à membrane, à grande ouverture, généralement raccordés à un enregistreur comportant une entrée pour un capteur tri-directionnel de vibration, les mesures synchrones étant réalisées selon la même configuration. Les sonomètres dédiés aux mesures acoustiques ne peuvent pas être utilisés pour ces phénomènes, leur domaine fréquentiel de mesurage ne couvrant pas les infrasons (<20 Hz).

Ces microphones sont mono-directionnels et doivent être orientés dans l'axe tir capteur en champ libre, parallèles au mur le plus proche de l'axe tir capteur à l'intérieur d'un bâtiment.

Ils doivent être implantés sur un pied d'un mètre et à une distance de 1,5m des murs afin de limiter les effets des couches limite, ces dispositions étant toutefois sujet à débat du fait des grandes longueurs d'onde des phénomènes (68 m à 5 Hz par exemple).

2-3-2 Nouveaux résultats obtenus.

Concernant l'évaluation des effets des surpressions sur l'homme, il existe une courbe de pondération spécifique, pondération G, pour les bandes de tiers d'octave comprises entre 1 et 100 Hz décrite sur la figure 15 ci dessous extraite d'un article rédigé par M Jacques CHATILLON publié en 2006 dans la revue de l'INRS.

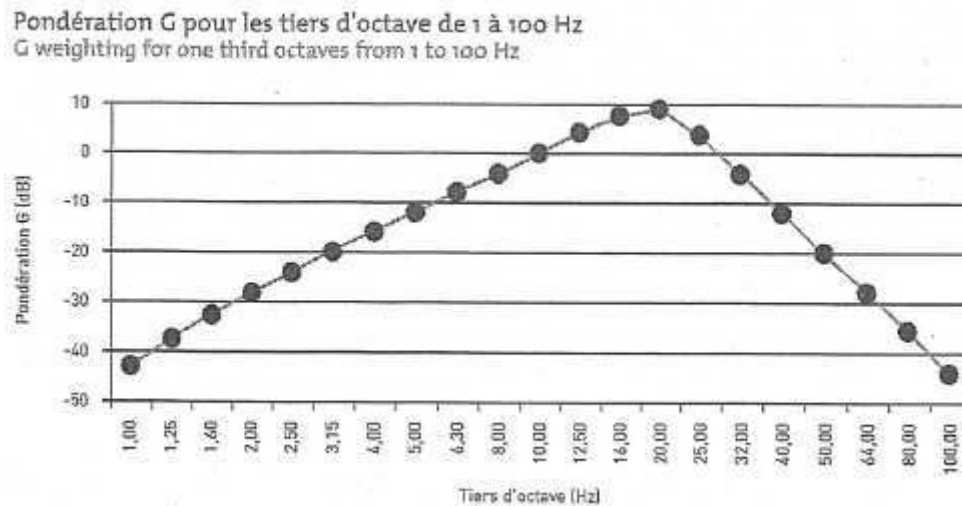


Figure 15 :. Définition de la pondération G

Cette pondération est adaptée aux infrasons émis sur un intervalle de temps long ou de manière continue, mais ne permet de décrire les phénomènes impulsionnels, de durée inférieure à 10 secondes comme les tirs de mine qui doivent être décrits selon des indicateurs prenant en compte l'aspect dynamique des signaux à traiter.

L'évaluation des effets des surpressions sur les structures peut être décrite de manière indirecte par une mesure synchrone de la surpression et des vibrations réalisées en élévation. La mesure conjointe permet de différencier l'effet des vibrations transmises par le sol de celles transmises par l'air. Compte tenu des fréquences généralement très basses de l'onde aérienne associée à un tir de mine, il convient de représenter les vibrations en déplacement pour en distinguer les effets, comme illustré sur la figure 16 ci dessous.

Ce mode d'évaluation indirect caractérise le couple structure-onde de surpression et ne peut être généralisé à plusieurs bâtiments. Cette approche permet par contre de séparer les effets des ondes aériennes et solidiennes sur une structure exposée aux effets d'un tir de mine.

Sur la figure sont comparés, lors de deux tirs, les traces temporelles des vibrations en vitesse et déplacement et la surpression mesurées au sommet du mur porteur de la façade face aux tirs. On constate que les courbes en déplacement sont quasi identiques aux courbes de surpression notamment en fin de signal sur les composantes à basses fréquences, attestant d'une réponse vibratoire de la façade sous l'effet de l'onde de surpression. Il y a par ailleurs un rapport entre la variation de la pression (respectivement 50 et 100 Pa et le déplacement maximale sur l'onde à basse fréquence respectivement de 0.1 et 0.32 mm).

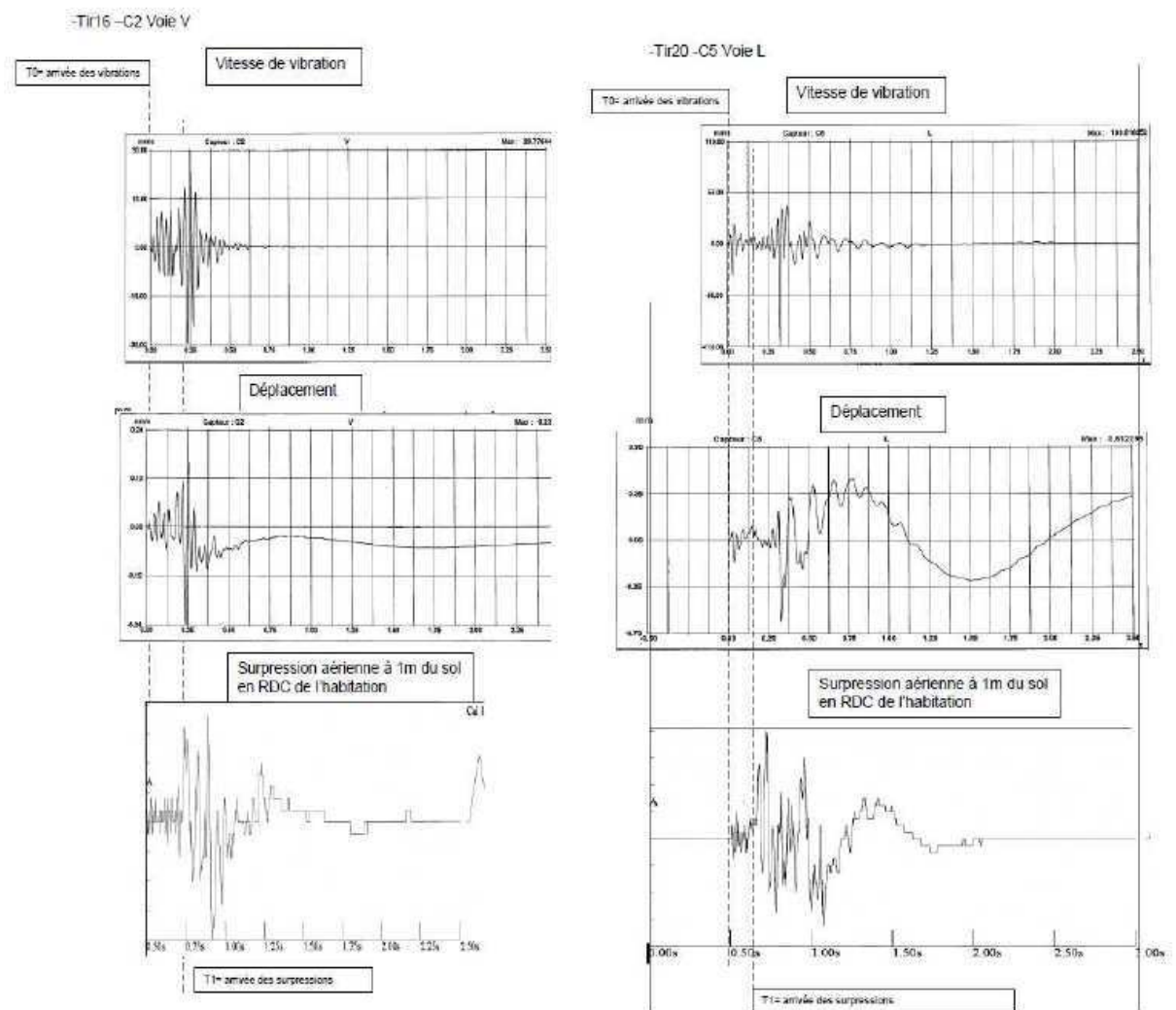


Figure 16 :. Comparaison des traces temporelles enregistrées en partie haute d'une façade en vitesse et déplacement pour les vibrations et pression lors de 2 tirs

En matière de traitement fréquentiel des signaux de surpression, il convient par ailleurs d'exclure des spectres de fréquence ou de la fenêtre d'auscultation la composante correspond à la vibration du microphone au passage des ondes solidiennes. Cette composante est facilement identifiable sur les enregistrements synchrones vibration-surpression ou par sa fréquence généralement plus élevée que celle du signal aérien, correspond à la fréquence propre d'oscillation de l'ensemble microphone-pied.

Enfin, concernant l'unité utilisée pour décrire les surpressions aériennes, l'emploi du décibel linéaire, par analogie avec les méthodes de l'acoustique, ne nous paraît pas forcément adapté sur un plan technique mais également en terme de communication avec les riverains :

- Sur un plan technique, les lois de propagation et les effets dynamiques sur les structures s'expriment en Pa, ainsi, cette unité est-elle la seule utilisée dans le guide PPRT traitant des surpressions ou dans les études de danger. Tous les

traitements et toutes les interprétations appliqués au signal se font sur le signal dynamique exprimé en Pa.

- L'échelle logarithmique, usuelle pour les acousticiens, n'est pas d'un emploi facile pour matérialiser la progressivité des effets dynamiques des surpressions sur une structure.
- Pour la majorité des personnes, le décibel est un terme associé au bruit. La majorité des plaintes concernant les tirs d'explosif est exprimée en terme de vibrations. La présentation de la surpression aérienne en décibel crée une confusion, en donnant le sentiment que l'on ne traite pas la cause réelle de la gêne ressentie. Cette confusion est renforcée par les valeurs affichées qui excèdent généralement 110 dB, soit des valeurs très élevées selon des références communes en acoustique, alors que le niveau sonore induit par les tirs reste faible.

3 – INFLUENCE DE LA TECHNIQUE ET DU DIMENSIONNEMENT DES TIRS

3-1 - Rappel des résultats précédents

Les paramètres fondamentaux agissant sur les caractéristiques de l'onde de surpression aérienne sont :

- L'orientation et le nombre des surfaces libres qui définissent des directions privilégiées d'émission des ondes aériennes ;
- Le volume du tir et les charges d'explosif mises en œuvre qui fixent le volume de gaz émis et de matériaux mis en mouvement ;
- Le confinement des charges qui va agir sur le mode d'émission des ondes de surpression en terme de vitesse d'émission et de fréquence.

La combinaison de ces trois facteurs permet de définir une hiérarchie dans la nocivité des ondes aériennes émises par les différentes techniques de tir, ainsi que dans l'influence des différents paramètres de dimensionnement des tirs sur les caractéristiques de l'onde aérienne.

Ces conclusions sont résumées dans le tableau ci dessous (figure 17), en les comparant aux mêmes critères exprimés en terme de vibrations transmises par le sol. Les flèches indiquent le sens de progression de la nuisance lorsque la valeur du paramètre augmente.

Paramètres du tir	Influence sur la vitesse de vibration	Influence sur l'amplitude de la surpression	Influence sur les fréquences associées à la surpression
Nombre de surfaces libres			
Maille-hauteur d'abattage			
Hauteur de bourrage			
Charge unitaire instantanée			
Charge totale nombre de trous			
Charge spécifique			?
Intervalle minimum de temps de la séquence de tir			
Type de tir et environnement			
Tir en gradin	Émission privilégiée à l'arrière du front	émission privilégiée face au front	Fréquences basses
Tir « cratère »	Émission privilégiée dans le sens croissant de la séquence de tir	Émission privilégiée dans le sens croissant de la séquence de tir	Fréquences basses
découpage	contraignant	contraignant	Fréquences audibles
relevage	contraignant	contraignant	Fréquences audibles
pétardage	peu contraignant	contraignant	Fréquences audibles
effet canon	sans effet	contraignant	Fréquences audibles
technique d'amorçage à privilégier	Fond de trou	fond de trou	?
conditions météorologiques	Sans effet	effet important	Peu d'effet

Figure 17 : Influence des paramètres de dimensionnement et des techniques de tir sur les surpressions aériennes émises dans l'environnement

On constate, à la lecture de ce tableau, que l'évolution des paramètres de dimensionnement du tir n'agit pas de façon identiques sur les caractéristiques des vibrations et des surpressions.

Les modifications du plan de tir qui favorisent la fragmentation et optimise le rendement de l'explosif sont favorables à la fois aux vibrations et aux surpressions (charge spécifique, séquence de tir). Par contre, les paramètres agissant sur le confinement des charges agissent de manière opposée sur les vibrations et les surpression (nombre de surfaces libres, maille, hauteur de bourrage). Les surpressions aériennes sont par ailleurs beaucoup plus sensibles aux conditions extérieures (météo) ou à des dysfonctionnements ponctuels du tir (effet canon, hétérogénéité du massif). Ces observations conduisent à conclure que :

- La modification d'un plan de tir, tendant à réduire les vibrations, conduit , dans la majorité des cas, à augmenter les surpressions aériennes ;
- L'émission de plaintes ponctuelles de riverains suite à une série de tirs de mine de dimensionnement identiques, incite à envisager un problème lié aux surpressions, sujettes à une plus grande variabilité que les vibrations solidiennes.

3-2 – Nouveaux résultats obtenus

Les mesures réalisées depuis 2002 confirment les résultats décrits dans le rapport initial et permettent de les compléter notamment concernant les tirs en zone urbaine et les tirs souterrains non traités en 2002.

Ces types de tir se caractérisent un confinement faible des charges au sens des surpressions aériennes.

En terme de minage la notion de tir confiné est associée au nombre de surfaces libres permettant d'assurer le dégagement des matériaux abattus. Selon cette définition les tirs souterrains sont des tirs très confinés car disposant d'une seule surface libre constituée du front d'abattage,. Les tirs en site urbain sont également fréquemment confinés soit par leur géométrie (tir de tranchée) soit volontairement afin d'éviter des projections.

La notion de confinement en terme de surpression aérienne est associée à la capacité des matériaux avoisinants les charges à s'opposer à la propagation des gaz en direction des surfaces libres. Selon cette définition les tirs souterrains comme les tirs en site urbain se caractérisent par un faible confinement des explosifs du à un bourrage de faible hauteur, voire à l'absence de bourrage. La charge spécifique élevée et les séquences de tir longue caractérisant les tirs souterrains ou les tirs de tranchée favorisent par ailleurs l'explosion à l'air libre de certaines charges par rupture prématurée du matériau environnant sous l'effet des charges voisines.

Les mesures que nous avons réalisées depuis 2002 sur des chantiers de ce type montrent qu'ils sont susceptibles de provoquer des ondes de surpressions aériennes importantes de façon très directive.

Les tirs en site urbain se caractérisent par la présence d'immeubles à courte distance des tirs (fréquemment moins de 10m) dont l'implantation ou l'architecture canalisent les ondes de surpression dans des directions privilégiées (rues, cours) voire créent des phénomènes de renforcement sur des points singuliers (porches, hall d'entrée). Ainsi avons nous mesuré, suite à des plaintes de riverais constatant des mouvements d'objet et de plancher des pressions crête de 40 Pa à 250m de tirs comportant 20 trous chargés à 1 Kg d'explosif sur des bâtiments situés à 4 rangées d'immeubles, les surpressions à 20m du tir sur le premier immeuble n'excédant pas 35 Pa.

Les tirs souterrains se caractérisent par une phase de propagation initiale dans l'ouvrage souterrain comparable à un tube. Lors de cette phase, les pressions maximales associées à l'explosion de chaque charge ne sont que très peu atténuées, cette atténuation ne provenant que des frottements sur les parois et des turbulences créées par les obstacles rencontrés dans la galerie. La combinaison des différentes ondes émises par chaque charge est extrêmement complexe, les ondes émises après l'explosion de la première charge se propageant dans un gaz fortement perturbé (milieu en mouvement, pression variable affectant les vitesses de propagation...). En émergeant à l'air libre, en tête de l'ouvrage l'onde est directive et se propage suivant un cône dans l'axe du tunnel de faible ouverture.

les caractéristiques de ces ondes de surpression mesurées à quelques centaines de mètres de la tête des ouvrages présentent une signature particulière sur tous les ouvrages sur lesquels nous disposons de mesure comme illustré sur la figure 18 sur laquelle sont comparés quatre enregistrements émanant de quatre tunnels différents.

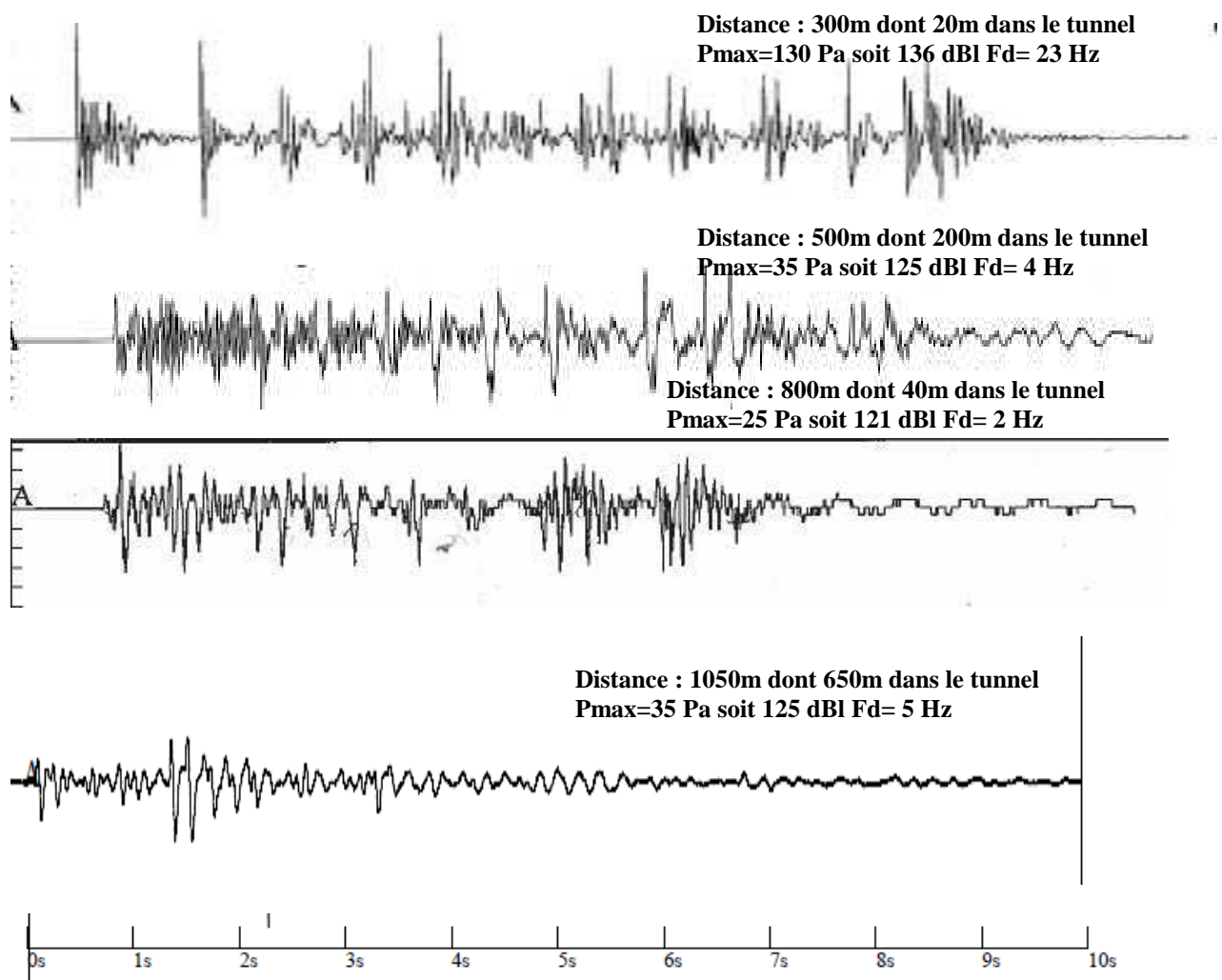


Figure 18 :. Enregistrements des ondes de surpression aériennes émises lors d'un tir sur 4 tunnels différents

Tous ses signaux se caractérisent par une durée voisine de 8s, à l'échelle des séquences de tir longues utilisées en travaux souterrains. Le signal présente à courte distance des composantes à hautes fréquences et une succession d'impulsions. Ces composantes à hautes

fréquences s'atténuent avec la distance pour privilégier un régime oscillatoire continu à fréquence relativement basse (2 à 5 Hz sur ces exemples). A noter sur la deuxième courbe (distance 500m), une composante en début de signal (1 à 3 s) à hautes fréquences correspondant à l'oscillation du microphone sous l'effet des vibrations du sol.

Ce régime particulier aux tirs souterrains de type mono fréquentiel continu peut provoquer des réponses vibratoires amplifiées de certaines structures notamment lorsque la fréquence d'excitation est proche des régimes oscillatoires propres des façades, sujet traité dans le détail dans le chapitre suivant.

4 – EFFETS DES SURPRESSIONS AÉRIENNES

4-1 - Rappel des résultats précédents

Les effets des surpressions aériennes provoquées par un tir de mine ne se limitent pas au simple bruit facilement identifiable mais ne représentant qu'une part minimale de l'énergie transmise. La part prépondérante d'énergie transmise en infrasons sollicite les structures et leurs occupants sans être associable au bruit du tir, ni identifié comme un phénomène d'origine aérienne.

Pour des pressions très élevées, les surpressions aériennes sont susceptibles de provoquer des effets destructeurs, ce domaine correspondant au sujet traité dans le guide PPRP précédemment cité. Ces dommages sont fort heureusement sans commune mesure avec les effets que l'on peut craindre d'un tir de mine. On conçoit bien toutefois qu'il existe une progression dans ces effets, et qu'avant les dommages se manifestent des déformations élastiques des structures et de la gêne que les riverains n'identifient pas comme du bruit mais comme des vibrations.

Lorsqu'une onde de surpression atteint une structure, elle lui applique une force dont l'intensité dépend de la pression exercée et de la surface sollicitée. La structure répond à cette sollicitation par un déplacement dépendant de sa géométrie, de son élasticité et de sa masse. Cette réponse présente une phase d'oscillations forcées au passage de l'onde puis d'oscillations libres en phase d'amortissement. Ce qui est vrai pour la structure l'est aussi pour les aménagements intérieurs (cloisons, planchers) ou le mobilier.

La réponse d'une structure et de chaque élément qu'elle contient, à une onde de surpression aérienne est donc une vibration. Cette vibration peut affecter l'ensemble de la structure ou un ou plusieurs éléments s'y trouvant en fonction des caractéristiques de l'onde incidente (pression, fréquences) et de chaque élément sollicité (masse, élasticité, degré de liberté, géométrie).

Dans le rapport initial de 2002, nous précisons que nous n'avons pas constaté de dommages liés incontestablement à ces surpressions sur des éléments de structures. Par contre de nombreuses manifestations affectant des éléments isolés sont imputables à ces ondes aériennes et notamment des vibrations de vitrage, des mouvements de tuiles ou des oscillations d'objets suspendus (lustres, cadres...). Ces manifestations correspondent à des vibrations propres d'éléments à fort degré de liberté ou grande élasticité, totalement découplés de la structure elle-même. D'autres manifestations, telles des vibrations de cloisons ou de

planchers, peuvent être attribuées à la réponse d'ensemble de la structure, amplifiée sur ces éléments les plus élastiques.

Concernant les effets sur les personnes, les niveaux généralement enregistrés (<350 Pa soit 145 dBL) et la brièveté des sollicitations semblent exclure toute perception directe du phénomène en dehors du bruit l'accompagnant. La perception indirecte, à travers la vibration de la structure ou du plancher et la mise en mouvement d'objets, constitue généralement l'effet le plus inquiétant pour les riverains, qui justifie par ailleurs l'expression d'une gêne liée aux vibrations.

4-2 – Nouveaux résultats obtenus

4-2-1- Effets sur les structures

Le guide PPRT précité, apporte des précisions importantes sur le comportement des structures soumis à une onde de surpression, quoique s'appliquant à des phénomènes d'énergie nettement plus élevée.

L'onde de surpression est fortement modifiée lorsqu'elle rencontre un obstacle, les modifications des pressions incidentes sur un bâtiment pouvant être des majorations ou des atténuations et dépendent essentiellement de l'orientation relative de la paroi considérée vis à vis de l'onde incidente. Le guide propose des coefficients de pondération définis selon les parois et le type d'onde incidente (chargement 1 : déflagration, chargement 2 : détonation), comme définis dans l'extrait de ce guide en figure 19 ci dessous

Les coefficients pouvant être valablement considérés sont donnés dans la figure 3 ci-dessous :

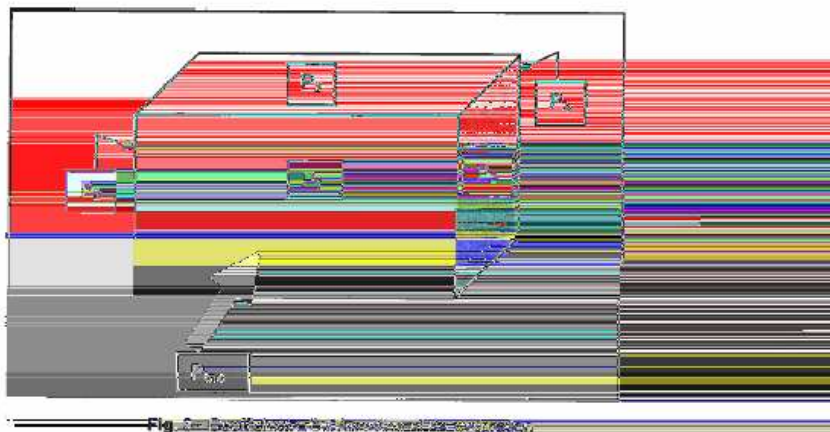


Figure 19 : Coefficients de pondération selon les parois- Guide PPRT surpression CSTB 2007

Les valeurs des pressions appliquées sur les parois sont données dans le tableau 3 ci-dessous, en fonction de la pression incidente. Deux cas de chargement sont à considérer successivement :

	Cas de chargement n°1	Cas de chargement n°2
P_1 / P_{me}	2,70	1,60
P_2 / P_{me}	1,20	0,90
P_3 / P_{me}	0,90	0,65

Lorsque les bâtiments présentent des parois biaisées par rapport au front d'onde, ces coefficients sont pondérés par une valeur calculée à partir de l'angle du biais.

La réponse d'une structure à une onde de surpression dépend :

- De la forme du signal (déflagration ou détonation)
- De la forme du bâtiment et de sa raideur
- De l'orientation de la structure vis à vis du front d'onde.

Cela signifie que, comme pour les vibrations transmises par le sol, il existe des sensibilités variables des structures aux effets des surpressions aériennes pouvant justifier d'une classification. Dans le rapport précité, quatre types de structures définies selon leur géométrie, la nature des matériaux les constituant et la fréquence propre de la structure porteuse, ont été étudiés :

- Type 1 : maisons individuelles de 1 à 2 niveaux, fréquences propres supérieures à 6.6 Hz ;
- Type 2 : bâtiments bas (<5 étages) en béton armé, fréquences propres comprises entre 1,6 et 6.6 Hz ;
- Type 3 : bâtiments élancés (+ de 4 étages) à planchers béton, fréquences propres comprises entre 0,66 et 1,6 Hz
- Type 4 : bâtiments industriels, fréquences propres inférieures à 0.66 Hz.

Cette notion de sensibilité variable des structures est mise en évidence à travers à la fois les mesures synchrones de vibration-surpression réalisées lors de tirs et peut expliquer des plaintes émanant de quelques riverains sur un grand nombre exposé à une même onde de surpression, la réponse de leur bâtiment pouvant être défavorable.

Pour mettre en évidence par une mesure de vibration, la réponse d'une structure sollicitée par une onde aérienne, il convient que le point de mesure soit situé en partie supérieure du bâtiment.

Pour affecter les parts respectives des vibrations transmises par le sol et par voie aérienne, il convient de disposer d'au moins deux points de mesures synchrones des vibrations et des surpressions l'un au niveau des fondations l'autre en élévation dans la structure. Ce mode opératoire n'est pas en soi nouveau concernant les vibrations puisqu'il est préconisé dans la circulaire du ministre de l'Environnement du 23/07/86, définissant le mode opératoire des mesures de vibration vis à vis du risque de dommages aux structures.

C'est cette méthode que nous avons utilisée dans les trois exemples traités ci après.

Exemple1 : tir de carrière à forte énergie

Cet exemple concerne le site expérimental de la carrière de Cressy sur Somme sur laquelle, l'exploitant a conservé une habitation, destinée à la démolition, à proximité des tirs d'abattage (moins de 30m pour les plus proches) afin que nous puissions corréler l'évolution des dommages de la structure avec les niveaux de vibration et de surpression émis lors d'une vingtaine de tirs.

Le bâtiment était instrumenté sur 10 points de mesure dont un capteur inclus au centre d'une cloison en briques et enduits de plâtre perpendiculaire au front d'onde de surpression.

La réponse de ce capteur, illustré par la figure 20, ci dessous montre que la vibration maximale de la cloison est provoquée par l'onde aérienne.

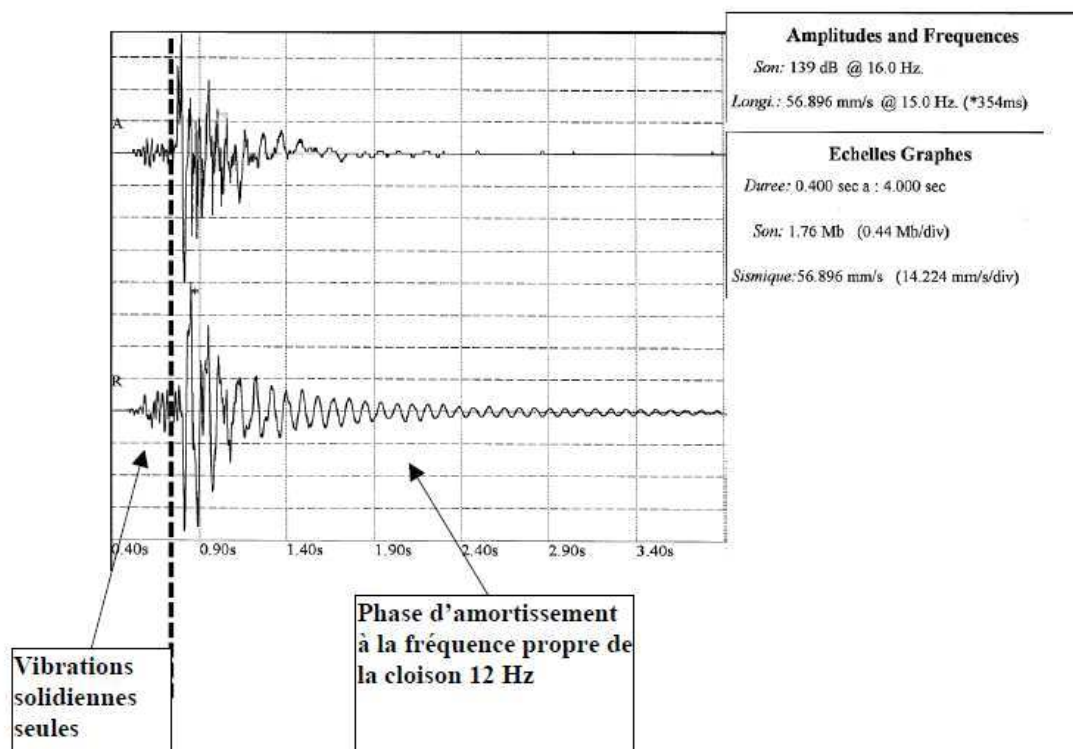


Figure 20 :. Vibration (en bas) et surpression aérienne (en haut) enregistrées perpendiculairement au centre d’une cloison en brique lors d’un tir d’abattage situé à 100m, avec une charge par trou de 50 Kg et une charge totale de 1 tonne d’explosif.

On constate que les vibrations transmises par le sol en début de signal atteignent une vitesse maximale de 9,5 mm/s. Les vibrations s’accroissent brutalement à l’arrivée de l’onde aérienne pour atteindre une vitesse de 60 mm/s pour une pression maximale voisine de 200 Pa soit 136 dBL. Ce phénomène s’explique par l’orientation de la cloison et son élasticité mais également par les fréquences élevées des vibrations solidiennes, très supérieures à la réponse propre de la cloison, alors que l’onde aérienne présente des fréquences comprises entre 10 et 20 Hz proche de la fréquence propre de 12 Hz de la cloison.

Les intensités des vibrations et des surpressions auxquelles ce bâtiment à été soumis sont très supérieures aux niveaux que l’on s’autorise sur des bâtiments à préserver, l’objectif étant d’étudier les dommages et donc de les provoquer. Au niveau de ces cloisons des décollements sont apparus entre la cloison et les poutres du plafond comme illustré sur la photo ci dessous (figure 21), dommage dont la responsabilité relève, à notre avis et au vu de la réponse vibratoire de la cloison, aux effets des surpressions plutôt que des vibrations solidiennes.

Cette exemple illustre les effets des surpressions sur un éléments de la construction à fort degré de liberté, découplé de la structure porteuse.



Figure 21 :. Chutes de plâtre et d'enduit au contact poutre-cloison sur un bâtiment soumis à des tirs de forte intensité.

Exemple2 : effets de tirs souterrains sur un bâtiment à façade de grande surface

Le bâtiment instrumenté est une maison bourgeoise du XIX^{ème} siècle, situé à 300m dans l'axe de la tête d'un tunnel creusé à l'explosif. Ce bâtiment comporte côté tir trois niveaux dont un sous toit mansardé. La façade face au tir à une longueur d'environ 40m pour une hauteur au faîtage d'environ 15m. Les murs sont en pierre avec au centre du bâtiment un mur à colombage (briques et bois) d'une surface d'environ 25 m². correspondant à une cage d'escalier sans refend. Les mesures synchrones vibration –surpression ont été effectuées suite à l'apparition de fissures sur l'enduit intérieur du colombage, les tirs instrumentés se situant à 500m du bâtiment dont 200m dans le tube. Les capteurs ont été placés niveau rez de chaussée sur mur porteur et au milieu du plancher au second niveau du bâtiment en face de l'escalier.

Des exemples de mesures sont joints en figure 22. On constate qu'au niveau du rez de chaussée, les vibrations présentent des vitesses très faibles (0,25 mm/s) maximales sur la voie horizontale perpendiculaire à la façade. Le signal vibratoire est synchrone avec l'onde de surpression dès qu'elle atteint la façade à la même fréquence dominante de 4,2 Hz.

Au niveau de l'étage les vibrations sont amplifiées dans un rapport de 8 à 15 synchrones avec l'onde de surpression dès qu'elle atteint la façade. La fréquence horizontale du plancher est identique à celle de l'onde de surpression. La fréquence verticale de 16 Hz correspond au régime propre du plancher dans cette direction et s'impose compte tenu du fort degré de liberté dans cette direction.

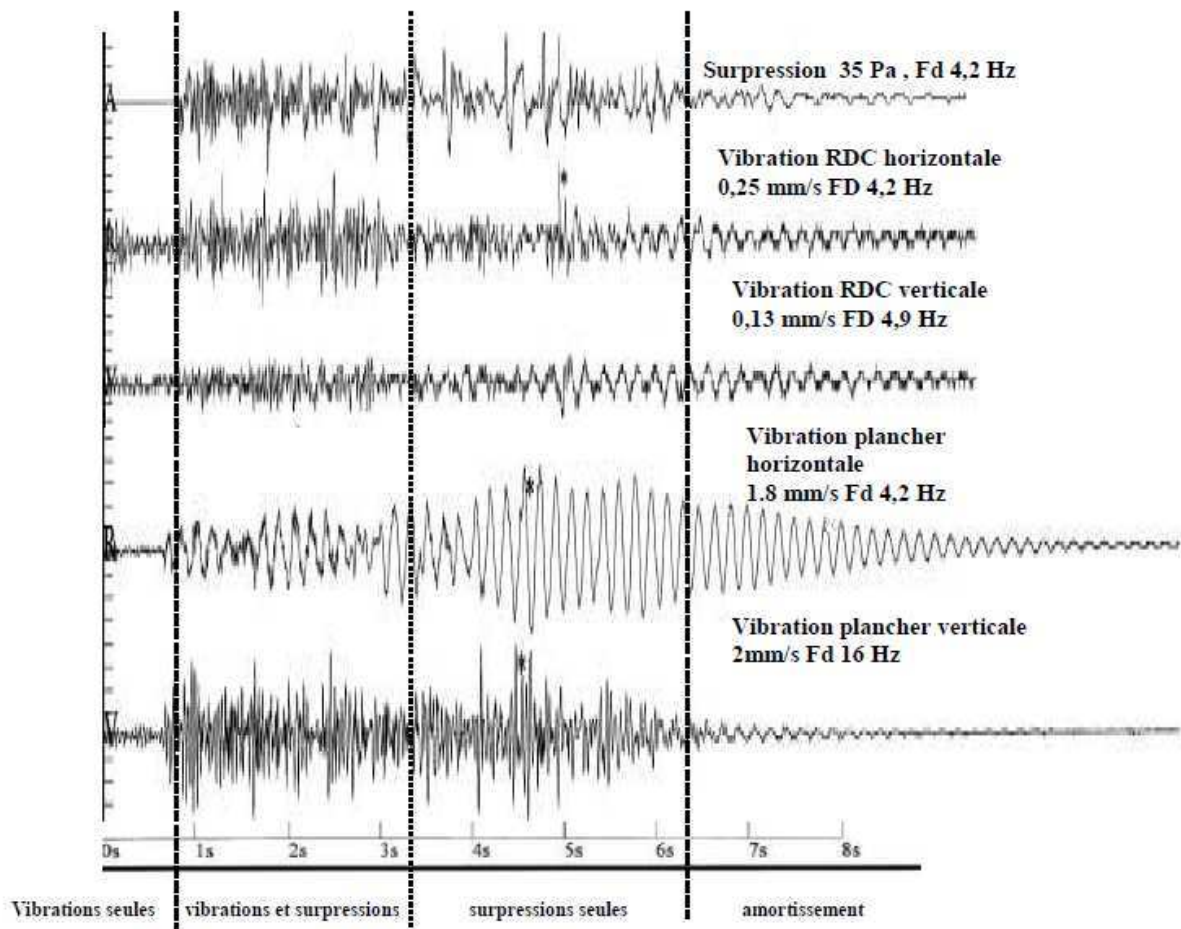


Figure 22 : Enregistrements des vibrations et surpressions lors d'un tir souterrain en RDC et milieu de plancher 2^{ème} niveau d'une habitation.

Les vibrations de la structure sont provoquées par l'onde aérienne, sa fréquence dominante de 4,2 Hz étant proche de la fréquence propre de la structure. La façade répond par une vibration importante dans sa perpendiculaire qui est transmise au plancher en voie horizontale. Le plancher amplifie également les vibrations en voie verticale mais à son régime propre de 16 Hz compte de sa faible raideur sous cet axe.

Les tirs précédents cette double instrumentation, plus proche du bâtiment avaient atteint des vitesses de vibrations de 1 mm/s . seuls quelques tirs avaient fait l'objet de mesures de surpression au RDC atteignant 90 Pa. Les niveaux maxima atteint sur le plancher ont probablement excéder 10mm/s . L'origine des dommages constatés sur le mur en colombage a été attribuée aux surpressions émises par les tirs.

Cette exemple illustre l'existence de bâtiment sensible aux effets des surpression du fait de leur géométrie , de leur réponse propre et de la raideur des matériaux de construction.

Exemple 3 : comparaison de tirs en déblai et en souterrain

Ce dernier exemple concerne des mesures réalisées sur une habitation suite à des mouvements de tuiles constatés par le propriétaire. L'habitation est un bâtiment ancien à deux niveaux et toiture en tuiles demi-rondes posées présentant une façade de 100 m² environ face aux tirs. Elle se situe à 200m d'un déblai extrait à l'explosif et 400m dans l'axe de la tête d'un tunnel creusé à l'explosif. Les mesures ont été réalisées à partir d'un capteur C1 (vibration/surpression) sur élément porteur au rez de chaussée (RDC), d'un capteur de vibration C2 sur élément porteur au 2^{ème} étage doublé d'un microphone basses fréquences C3. Trois tirs ont été enregistrés :

- Un tir extérieur (tir 1) dans le déblai à 200m avec une charge par trou de 22 Kg et une charge totale de 800 Kg
- Deux tirs (tirs 2 et 3) souterrain avec des charges unitaires de 9 Kg et une charge totale de 400 Kg. Ces tirs se situaient à 1050m dont 650m dans les tubes.

Les résultats de ces mesures sont synthétisés dans le tableau ci dessous (figure 23).

Résultats

Tir	Capteur	Voies	V max (mm/s)	Surpr (dBL)	Fréquence (Hz)	
1	C1	R	2,78		15	
		T	1,68		14	
		V	1,48		20	
		M		123	1,57	
	C2	R	2,18		23	
		T	1,68		15	
		V	3,91		21	
	C3	M		119	1,29	
	2	C1	R	0,11		5
			T	0,18		10
V			0,13		5	
M				126	5,51	
C2		R	1,25		5	
		T	0,57		5	
		V	0,19		5	
C3		M		122	5,35	
3		C1	R	0,11		5
			T	0,13		10
	V		0,11		5	
	M			124	8,52	
	C2	R	0,81		5	
		T	0,52		5	
		V	0,16		5	
	C3	M		119	8,19	

Figure 23 : Synthèse des résultats des mesures de vibration et surpressions sur les trois tirs

On constate sur ces résultats que le tir en déblai provoque les vibrations les plus élevées au RDC mais à des fréquences dominantes relativement élevées (14 à 20 Hz). Les amplifications dans la structure atteignent un facteur de 1,4. La surpression aérienne atteint 123 dBL soit 28 Pa à une fréquence dominante très basse correspondant au déplacement des matériaux.

Les tirs souterrains provoquent RDC des vibrations très faibles (0.18 mm/s) mais à basses fréquences (5 à 10 Hz). Les amplifications dans la structure sont très importantes dans un rapport de 7, la façade vibrant à une fréquence de 5 Hz. Les surpressions aériennes sont plus élevées que pour le tir de déblai pourtant nettement plus proche et plus chargé atteignant 126 dBL soit 40 Pa à une fréquence dominante de 5 à 8 Hz.

Les traces des signaux enregistrés sur 5 secondes en haut du bâtiment sont représentées sur la figure 24 ci dessous.

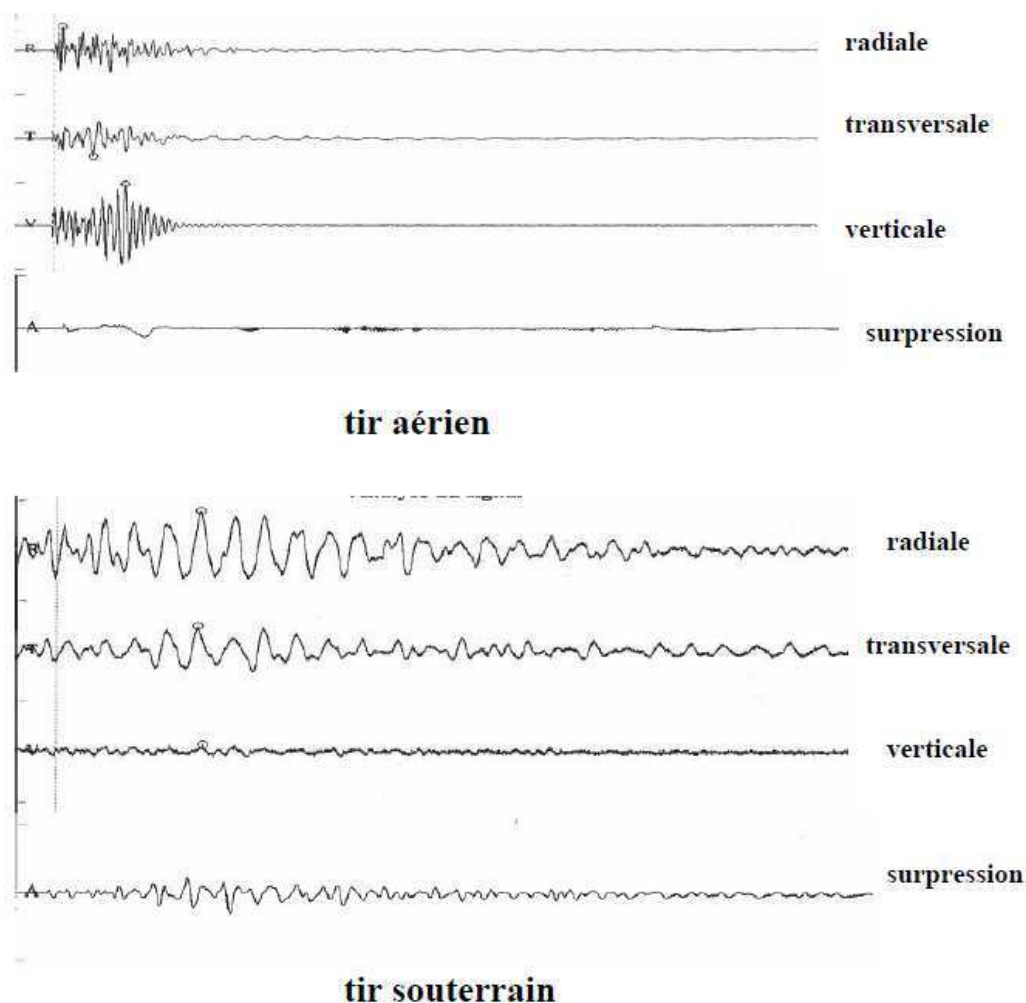


Figure 24 :. Traces enregistrées pour chaque type de tir en partie haute du bâtiment

On constate que le mode de sollicitation et la réponse de la structure sont très différents en fonction du type de tir :

- Le tir aérien sollicite la structure depuis son contact avec le sol sur une durée de moins de 1 seconde, puis les vibrations se s'y propagent selon ses modes propres avec une

amplification en voie verticale à la fréquence de 21 Hz correspondant à la fréquence propre de l'élément instrumenté dans cette direction. Cette amplification est privilégiée compte tenu des fréquences proches du signal transmis par le sol. L'onde de surpression aérienne ne provoque aucun effet sensible sur la structure.

- Le tir souterrain sollicite la structure par voie aérienne appliquant à la façade face au tir un régime d'oscillations forcées à une fréquence de 5 à 8 Hz sur une durée de plus de 5 secondes. La structure répond par une mise en vibration dans le plan horizontal à une fréquence de 5 Hz proche de son régime propre dans ce plan.

En terme d'effet sur la structure, et compte tenu des fréquences basses associées, les tirs souterrains provoquent des déplacements supérieurs au tir de déblai, pourtant nettement plus proche et plus chargé, en partie haute du bâtiment (40 microns pour 30 microns sur le tir aérien). Les tirs souterrains plus proches n'ont pas fait l'objet de mesure des surpressions, ni des vibrations en haut de la structure. Nous ignorons donc les contraintes maximales subies par ce bâtiment, mais il est probable qu'elles aient été suffisantes pour provoquer les mouvements de tuiles décrits.

En terme de gêne, les caractéristiques des vibrations transmises sur les planchers en haut du bâtiment apparaissent comme plus défavorables pour les tirs souterrains en terme de durée, de fréquence et de direction des mouvements.

Cet exemple illustre l'influence des techniques de tir mises en œuvre sur la nocivité des surpressions transmises dans l'environnement.

4-2-2- Effets sur les personnes

L'étude bibliographique publiée par Jacques CHATILLON dans la revue de l'INRS (*Hygiène et sécurité du travail- cahier de notes documentaires- n°203-2006*), apporte des précisions importantes sur les effets des ondes infrasoniques sur les personnes.

En perception de perception, il semble que le terme d'infrasons soit inexact, l'oreille étant sensible à des phénomènes à très basses fréquences mais pour des pressions très élevées. Ceci signifie, compte tenu de l'intensité des ondes aériennes émises par un tir que des composantes à fréquences inférieures à 20 Hz sont perçues en tant que bruit comme illustré sur la figure 25 ci dessous, extraite de cet article.

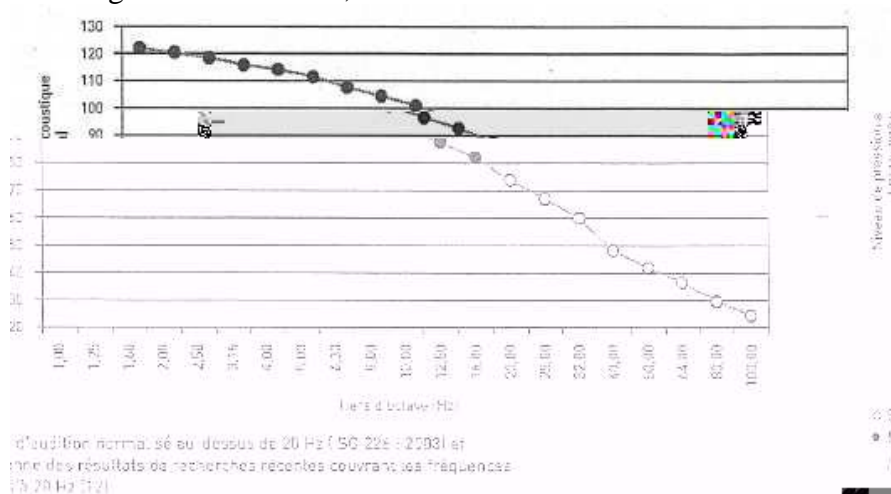


Figure 25 :. Seuil d'audibilité moyen dans le domaine des basses fréquences d'après MOLLER H et PEDERSEN C.S 2004

Des études ont également montré que ces phénomènes peuvent être perçus par l'ensemble du corps comme une vibration. Cette perception, appelée « vibrotactile », apparaît pour des pressions de l'ordre de 30 Pa soit 124 dBL à 4 Hz, et de 13 Pa soit 116 dBL à 16 Hz. Ces valeurs sont à l'échelle des surpressions émises par les tirs de mine. Les infrasons sont également susceptibles de provoquer des effets physiologiques dépendant des niveaux mais surtout des durées d'exposition. A ce titre, les ondes de surpressions émises par les tirs de mine ont des durées et des fréquences très faibles permettant à priori d'exclure ce type d'effets.

Il n'existe pas à ce jour de limite réglementaire nationale ou internationale concernant les effets de ces phénomènes sur l'homme, mais des recommandations émises dans certains pays sur les niveaux considérés comme pénibles ou dangereux. Ces recommandations sont définies soit en dBL notamment pour les phénomènes impulsionnels comme les tirs de mine, soit en DBG pour des phénomènes continus ou fréquents, ramenés à une durée d'exposition.

À l'exception du bruit du tir proprement dit, qui ne fait généralement pas l'objet de remarques de la part des riverains car très bref et parfaitement identifié, les effets des surpressions aériennes sur les personnes se manifestent par des vibrations perçues directement (perception vibrotactile) ou indirectement (vibration de la structure) et des mouvements et bruit de mobilier et d'objets. Il est donc naturel dans ce contexte que les riverains expriment leur ressenti en terme de vibration. Il est tout aussi naturel que la réponse à ces plaintes prennent la forme de mesures de vibration, pratique courante depuis de nombreuses années. Il apparaît toutefois que ces mesures, généralement effectuées niveau rez de chaussée sur un élément porteur, ne permettent pas de décrire le régime vibratoire affectant les récepteurs par voie aérienne.

Les vibrations créées par les ondes de surpression aérienne associée à des tirs de mine correspondent à des phénomènes dynamiques qui s'étudie et s'analyse à partir des signaux temporels exprimés en Pascal ou dBL et non en unité pondérée de type DBG. Le tableau de la figure 26 ci dessous synthétise les effets potentiels de ces ondes sur les structures et les personnes en fonction de leur intensité.

Pression maximale de l'onde aérienne émise par un tir d'explosif		Effets constatés ou seuils applicables
Décibel Linéaire dBL	Pascal Pa	
<94	<1	imperceptible
112	8	Apparition des premières plaintes isolées
120	20	Probabilité de plaintes élevée. Vibrations des vitrages, oscillations des lustres.
125	35	Seuil conseillé par l'arrêté du 22/09/94 (tirs en carrière)
130	63	Seuil de dommage préconisé au USA pour les constructions sensibles (USBM) ;vibrations sensibles des planchers
135	112	Premiers dommages superficiels (fissuration de plâtre et d'enduits) ; déplacement de tuiles
140	200	Bris des vitres les plus fragiles
145	350	Seuil d'exposition des personnes conseillé dans les publications récentes
170	6000	Bris de tous les vitrages non traités spécifiquement

Figure 26 : Synthèse des effets progressifs de la surpression aérienne provoquée par un tir de mine

5 – APPROCHE CONJOINTE VIBRATION-SURPRESSION

5-1 - Rappel des résultats précédents

La nécessité d'une approche conjointe vibration/surpression pour évaluer les effets des tirs de mine vis à vis notamment du ressenti des riverains impose de disposer d'un indicateur global permettant d'analyser l'influence relative de chaque nuisance dans l'origine des effets constatés. Dans ce but nous avons utilisé l'abaque proposé par J. BOXHO en 1977 et publié en France par P. BOILLAT en 1995 (La surpression aérienne-EXPLOTECH).

Le report sur cet abaque des données disponibles en 2002, a permis de vérifier la pertinence de cette approche mais également ses limites. La figure 27, ci dessous reproduit cette analyse ainsi que les courbes de Boxho.

Ces courbes, établies à partir de mesures in situ avec enquête auprès des riverains, permettent de qualifier le ressenti d'un tir à partir du couple vibration/surpression mesuré en milieu de plancher dans les bâtiments.

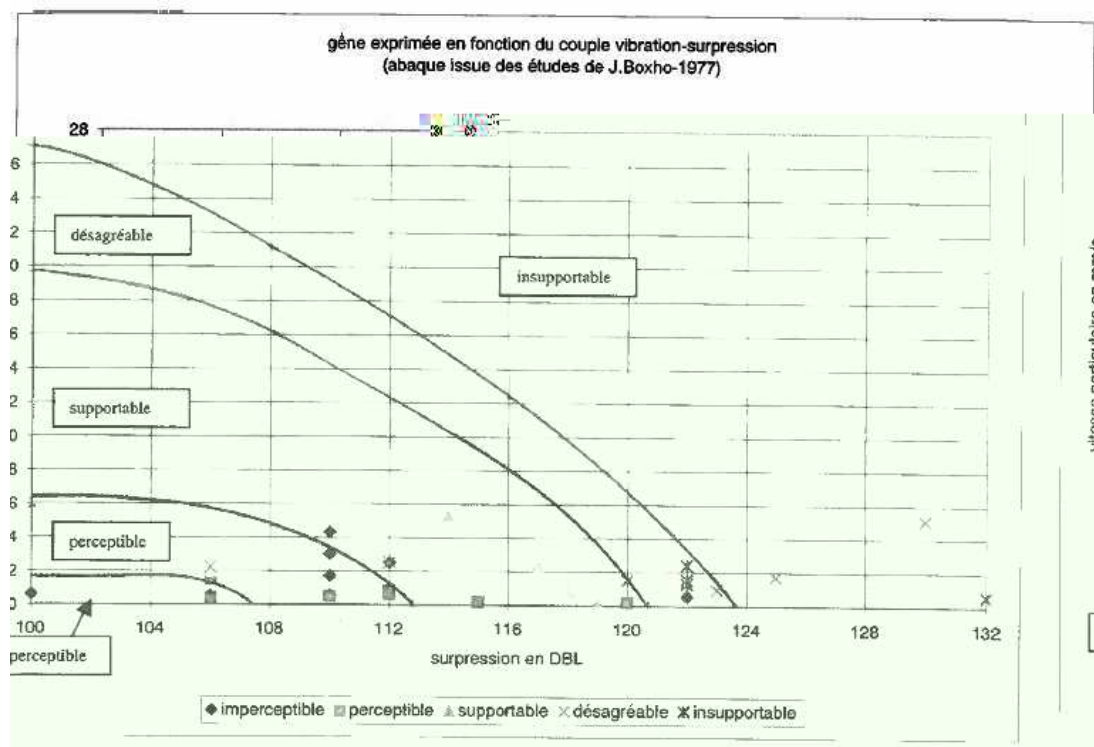


Figure 27 :.Abaque de Boxho avec report des mesures analysées en 2002

Il ressort une bonne corrélation entre le ressenti exprimé par les riverains et sa qualification à partir d couple vibration surpression. Par contre nous constatons que la définition des courbes semble optimiste en terme de vibration et pessimiste quant à l'effet des surpressions.

Ces constats sont probablement faussés par l'échantillon utilisé constitué de mesures réalisées sur des carrières et des chantiers ayant fait l'objet d'études de vibration et de maîtrise

de leurs effets. Il est normal dans ce contexte que les surpressions, non étudiées, apparaissent comme la nuisance principale des tirs.

Ce constat illustre le fait que les vibrations sont l'objet d'études et de contrôles depuis de nombreuses années permettant d'assurer une bonne maîtrise de ces phénomènes. Par contre, cette approche basée uniquement sur ces vibrations a conduit à négliger les effets des surpressions aériennes, voire dans certains cas à les augmenter, les modifications des plans de tir dans le but de réduire les vibrations pouvant fréquemment conduire à augmenter les surpressions émises.

Une des principales difficultés rencontrées dans l'application des courbes de Boxho réside dans l'implantation des capteurs à l'intérieur des bâtiments, difficile dans la pratique à mettre en œuvre lors d'une étude mais encore plus lors de contrôle régulier pour des problèmes d'accessibilité au point de mesure.

5-2 – Nouveaux résultats obtenus

Nous avons recherché à modifier les courbes de Boxho pour pouvoir les utiliser dans le cadre de suivi et de contrôle des effets des tirs lors d'un chantier. Dans ce but nous avons redéfini les critères de vibration en ramenant le point de mesure niveau rez de chaussée sur élément porteur.

Cette modification d'échelle et de point de référence à consister à appliqué un coefficient moyen d'atténuation entre les planchers et un élément porteur du rez de chaussée de 2 puis à recalculer les valeurs à partir de mesures sur site avec enquête auprès des riverains. Les courbes ainsi définies se corrélaient moins fidèlement avec le ressenti des riverains car elles négligent le risque d'amplification importante de certains planchers. Mais en contrepartie elle permet d'étendre la méthode à un plus grand nombre de données et de poser un premier diagnostic sur la base de mesures de contrôle sur l'orientation à donner à des études plus détaillées en indiquant la contrainte principale à traiter.

Les figures 28 et 29 ci dessous illustre l'utilisation de ces courbes de Boxho modifiées pour analyser l'origine de la gêne provoquée par des tirs en carrière.

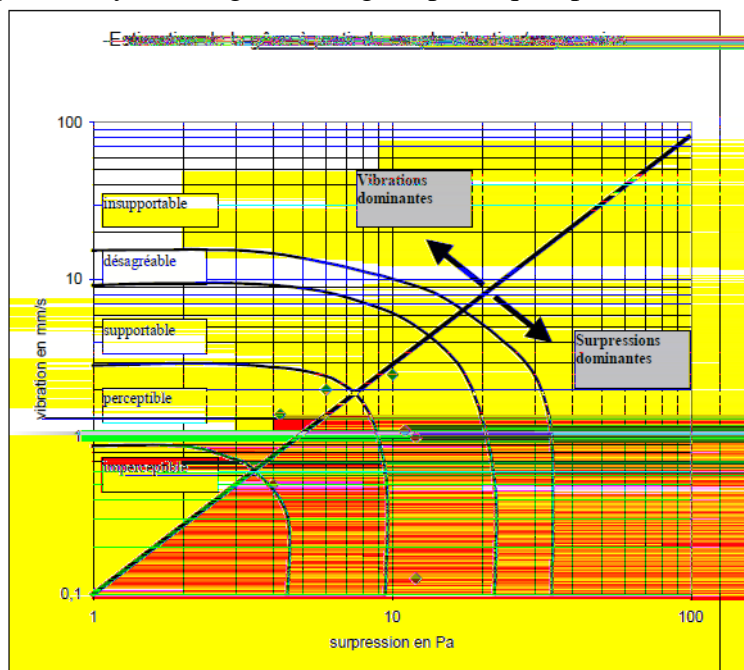


Figure 28 : report des mesures de vibrations surpression sur les courbes de Boxho modifiées



Figure 29 : définition des périmètres d'effets d'un tir à partir des critères des courbes de Boxho modifiées.

Le report des résultats des mesures sur l'abaque permet de qualifier le ressenti du tir par les riverains et de déterminer si le facteur déterminant est la vibration du sol ou la surpression aérienne (figure 28). L'utilisation des lois de propagation des vibrations et des surpressions couplées avec les critères de ressenti permet d'établir une cartographie de l'environnement du tir selon l'intensité du ressenti et le facteur prédominant (figure 29).

Sur cet exemple, la carrière maîtrise ses vibrations depuis de nombreuses années, les surpressions sont la cause principale des effets des tirs pour environ 80 % du périmètre face au front de taille. Les vibrations ne constituent la contrainte dominante que pour 20% de ce périmètre, à l'arrière du front. A partir de ces éléments, l'exploitant sait qu'il est inutile de rechercher à réduire la gêne en agissant sur les vibrations (réduction ou étagement des charges, de la maille) mais qu'il doit plutôt agir sur les surpressions (orientation des fronts de taille, confinement des charges.....).

Le second exemple illustré ci-dessous concerne un chantier de terrassement à l'explosif en zone urbaine, les tirs étant réalisés à des distances comprises entre 5 et 60m des trois constructions instrumentées. Les résultats des mesures reportés sur l'abaque de boxho modifié avec les surpressions en dBL sont représentés sur la figure 30 ci-dessous

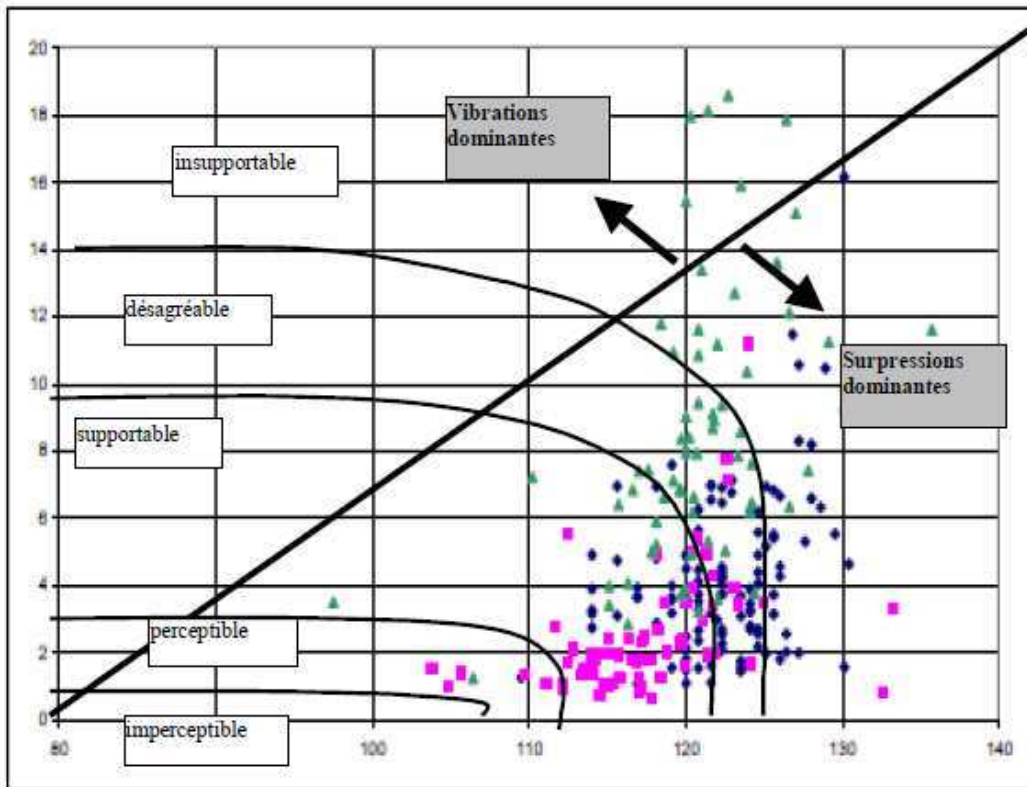


Figure 30 : report des mesures de vibrations surpression sur les courbes de Boxho modifiées sur trois points de mesures et 125 tirs réalisés entre 5 et 60m des bâtiments

On constate que ces tirs réalisés à proximité immédiate de construction provoque une gêne parfois importante des riverains, les seuils fixés pour ce type de chantier étant des seuils de dommages. Cette évaluation de la gêne est par contre sur évaluée notamment en comparaison des réactions exprimées par les riverains. Ces réactions, favorables à l'explosif, sont par ailleurs fortement dictées par leur sentiment vis à vis de la solution variante au minage qui consistait à extraire les matériaux à l'aide de brise roches hydrauliques, ressentis comme insupportable par le bruit qu'ils généraient sur des durées importantes.

Cette surévaluation de la gêne tient probablement à l'approximation introduite par le coefficient d'amplification de 2 introduit entre plancher et fondation. En effet, à courte distance les vibrations et surpression maximales sont généralement associées à des composantes à hautes fréquences qui s'atténuent rapidement avec la distance y compris dans les structures. Ici illustre l'autre imprécision de ces courbes qui réside dans l'absence de prise en compte de la fréquence des phénomènes enregistrés.

On constate tout de même que les surpressions aériennes constituent sur ce chantier la contrainte principale en matière de gêne, seuls quelques tirs sur un capteur (vert) montrent une prédominance des vibrations.

En conclusion, ces courbes sont perfectibles, notamment par une prise en compte de la fréquence, mais elles permettent de distinguer les effets relatifs des vibrations transmises par le sol et des surpressions transmises par voie aérienne et sont un outil de décision intéressant pour orienter les modifications à apporter aux plans de tir pour traiter des plaintes de riverains.