

Commentaires et réponses

Alain Joets

Laboratoire de Physique des Solides
Bât. 510, Université Paris-Sud
91405 Orsay cedex, France
joets@lps.u-psud.fr

Premier commentaire

Reçu le 30 juin 2009.

Commentaires sur la note de A. Joets intitulée : « Réfutation de l'hypothèse sismo-acoustique invoquée pour le double bang de la catastrophe de Toulouse (France) du 21 septembre 2001 »

Michel Cara, Antoine Schlupp, Christophe Sira, Michel Granet

Bureau Central Simologique Français, Université de Strasbourg, 5, rue R. Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France
adresse e-amil : michel.cara@unistra.fr

Dans sa note, Joets [1] propose l'existence de deux sources distinctes pour expliquer le « double bang » sonore perçu par la population lors de l'explosion AZF de Toulouse du 21 septembre 2001. Son analyse le conduit à rejeter une hypothèse basée sur une seule source d'émission d'ondes formulée en 2002 par Souriau et al. [2]. Selon cette hypothèse, le premier « bang » pourrait provenir de la conversion de l'onde sismique P en onde acoustique, le deuxième, plus énergétique, venant de la transmission directe du son dans l'air. Les auteurs [2] indiquaient par ailleurs que pendant les 13,5s précédant l'arrivée de l'onde sismique P aucun signal n'était observable sur l'enregistrement du sismomètre alors en test dans le bâtiment de leur laboratoire situé à 4,2 km du lieu de l'explosion. Ils concluaient que si une première explosion avait précédé l'événement principal, « *elle n'a pas engendré de signal sismique détectable (elle n'était pas couplée au sol, ou était d'énergie trop faible)* ». Pour sa part, Joets [1] ne rejette pas la possibilité d'ondes sismo-acoustiques précédant « *l'énorme onde de choc AZF* », mais il conclut qu'elles ont « *les caractéristiques attendues de ces ondes, comme leur simultanéité avec les ondes P et un spectre fréquentiel centré sur les basses fréquences acoustiques (grondement)* ».

Contrairement à cette affirmation, les caractéristiques des ondes sismo-acoustiques ne se résument pas à de simples « grondements ». L'expérience acquise par le Bureau Central Sismologique Français (BCSF) sur les témoignages de bruits entendus lors de séismes montre qu'un claquement sonore sec - qualifié ici de « bang » comme dans [1] - est fréquemment entendu à proxi-

mité de l'épicentre d'un séisme tectonique ([3, 4]). Ces témoignages évoquent « *l'explosion d'une bouteille de gaz* » ou celle « *d'une chaudière* », ou encore le « *passage du mur du son par un avion* ». Ce « bang » sonore s'explique par le couplage sismo-acoustique sol-air. Il est audible à proximité de l'épicentre d'un séisme dont le foyer est à quelques kilomètres de profondeur. En plus de ce « bang » accompagnant l'onde sismique P, les témoins rapportent fréquemment avoir entendu des « grondements souterrains » accompagnés de vibrations. Pour les petits séismes, ces « grondements » sont souvent audibles jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres de l'épicentre.

Dans le cas du séisme de Rambervillers du 22 février 2003 à 21h41-heure légale (magnitude locale $M_L = 5.4$, profondeur 12 km) [3], parmi les 2653 témoins situés à moins de 50 km de l'épicentre et ayant répondu positivement à la question « bruits entendus », 28 % d'entre eux ont coché la case « forte explosion ». Dans les dix premiers kilomètres ce pourcentage monte à 52,6% et il diminue ensuite régulièrement avec la distance (tableau). Dans le cas du séisme de Cognac du 24/08/2006 à 22h ($M_L = 4.1$, profondeur 2 km [5]), l'effet est encore plus net. Dans la tranche 0-15 km le BCSF dispose de 180 témoignages dont 162 signalent un « bruit » et, parmi ces derniers, 67% rapportent un « bruit d'explosion ». Ce pourcentage chute à 28% dans la tranche de distance 15-50 km alors que le « grondement » devient prépondérant avec 60% des témoignages. Pour les séismes de magnitude plus faible, le nombre de témoins se réduit en général à quelques dizaines (le BCSF déclenche une enquête pour $M_L \geq 3.5$,) et les témoignages de « bruits d'explosion » restent très fréquents près de l'épicentre. On peut citer [3] : Bagnères-de-Bigorre le 5/11/2005 à 1h30 ($M_L = 3.5$), « *on a cru à un bang d'avion supersonique* » ; Alberville le 31/10/2005 à 4h39 ($M_L = 3.6$) « *grondement soudain, parfois bruit d'une explosion* » ... Pour une source superficielle de magnitude $M_L = 3.4$ qui est la magnitude attribuée à l'explosion AZF, on peut ainsi conjecturer, par analogie avec ces observations de séismes, que des témoins ont pu entendre un premier « bruit d'explosion » d'origine sismo-acoustique jusqu'à une quinzaine de kilomètres de l'épicentre.

L'analyse de Joets [1] réfutant le fait qu'un couplage sismo-acoustique puisse être à l'origine du « premier bang » perçu par la population repose sur l'examen d'une sélection de seulement 12 témoignages distribués sur des distances allant de 110 m à 48,3 km et de quelques enregistrements sur magnétophone dont deux seulement semblent exploitables. Les signaux des magnétophones ne sont pas montrés si bien que le lecteur ne dispose d'aucune information sur le rapport d'amplitude entre les deux « bangs ». La partie droite de cette fi-

gure montre 16 localisations d'observations et sa partie gauche 14 estimations d'écarts de temps entre les deux « bangs », dont 2 provenant probablement des magnétophones (points). Le raisonnement présenté dans [1] ne concerne que cet écart de temps : si couplage sismo-acoustique il y a, l'écart devrait croître quasi-linéairement avec la distance. Cette croissance n'étant pas observée, l'hypothèse de [2] est réfutée.

Il est clair que, sauf à remettre en cause les témoignages, un premier « bang » arrivant 6 à 11s avant l'onde de choc principale ne peut en aucun cas être expliqué par un couplage sismo-acoustique à moins de 1km de l'épicentre. Par contre, entre 1 et 10 km rien ne permet d'écarter la possibilité qu'un premier « bang » sonore soit dû au couplage sismo-acoustique de l'onde P. C'est dans cet intervalle de distances que se situent cinq des douze témoignages, dont un à 1180m, 3s environ avant l'onde de choc principale (figure), ainsi que les deux mesures sur magnétophone que l'on suppose correspondre aux 2 points sur la figure [1]. C'est dans cet intervalle de distances que se trouve le sismomètre dont l'enregistrement de la composante verticale montre une claire onde P impulsive 10s avant l'arrivée de l'onde acoustique principale [2]. C'est enfin dans cet intervalle de distances que des « bangs » sont très largement observés lors de petits séismes tectoniques.

Si l'on n'écarte pas l'hypothèse précurseur, supportée par les témoignages les plus proches, il reste à expliquer pourquoi elle n'a pas produit de signal sismique observable sur le sismomètre situé à 4,2 km de l'épicentre. Un tel signal émis entre 6 et 11 s avant l'explosion AZF devrait en effet arriver dans l'intervalle de temps de 13,5s précédant l'onde P alors qu'aucun signal n'y est détectable [2]. Comment se fait-il qu'un « bang » créé par cette première explosion ait pu être entendu jusqu'à 50 km de distance [1] sans engendrer d'onde sismique observable sur le sismomètre situé à 4,2 km de l'épicentre ? On peut difficilement concevoir une source sonore assez puissante pour être audible à près de 50 km tout en étant suffisamment découplée du sol pour ne pas créer de signal sismique détectable à 4,2 km. Si cette source a existé, elle a dû être de faible puissance.

En résumé, les témoignages sur les effets des séismes reçus au BCSF nous permettent d'affirmer que les « bang » sonores d'origine sismo-acoustique sont fréquemment entendus à proximité de l'épicentre de séismes de magnitude comparable à celle de la source sismique liée à l'explosion AZF. Si l'on extrapole au cas d'une source en surface, il nous paraît tout à fait possible qu'un phénomène sismo-acoustique ait engendré un « bang » sonore précurseur, coïncidant avec l'arrivée de l'onde P réfractée en profondeur, en

Intervalle de distances km	Nombre de témoignages	Nombre de témoins entendant un « bruit »	Nombre de témoins entendant une « forte explosion »	Poucentage de « Fortes explosions » parmi les « bruits »
0-10	211	209	110	52,6%
10-20	571	558	205	28,0%
20-30	1002	962	269	21,2%
30-40	584	546	116	10,8%
40-50	411	378	41	10,2%
<i>total</i>	<i>2779</i>	<i>2653</i>	<i>741</i>	<i>28,0%</i>

TAB. 1 – Témoignages BCSF rapportant la perception d’un bruit de type « forte explosion » lors du séisme de Rambervillers du 22 février 2003 dans les Vosges ($M_L = 5.4$, profondeur du foyer 12km). Les témoignages sont classés par tranche de distances à l’épicentre. Les pourcentages indiquent les proportions de témoins entendant une « forte explosion » parmi ceux ayant coché la case « bruits entendus ».

accord avec l’hypothèse des auteurs [2]. L’argumentation présentée dans [1] nous paraît très succincte et basée uniquement sur une sélection de quelques rares témoignages. Ceci contraste avec les très nombreux témoignages spontanés reçus au BCSF qui montrent que les « bruits d’explosion » sont communément entendus lors de séismes.

Références

- [1] A. Joets, Réfutation de l’hypothèse sismo-acoustique invoquée pour le double bang de la catastrophe de Toulouse (France) du 21 septembre 2001, C. R. Geosciences (2009) doi :10.1016/j.crte.2009.03.001.
- [2] A. Souriau, M. Sylvander, V. Maupin, J.-F. Fels, A. Rigo, Enregistrements sismologiques de l’explosion sur le site de l’usine AZF (Toulouse, France), C. R. Geosciences, 334 (2002) 155-161.

- [3] M. Cara, A. Schlupp, C. Sira, Observations sismologiques : sismicité de la France en 2003, 2004, 2005, Bureau central sismologique français, ULP/EOST-CNRS/INSU, Strasbourg (2007) 197p.
- [4] M. Sylvander, & D.G. Mogos, The Sounds of Small Earthquakes : Quantitative Results from a Study of Regional Macroseismic Bulletins, Bull. Seismol. Soc., Am. 95 (2005) 1510-1515.
- [5] BCSF (2006) - Séisme de Cognac (Charente) du 24 août 2006, note préliminaire, BCSF 2006-NP2, 30p. (www.franceseisme.fr/donnees/intensites/2006/060824_2000/060824Note-Preli_Cognac.pdf)

Ma réponse au premier commentaire

Envoyé le 30 juillet 2009.

Nos commentateurs traitent essentiellement d'une conjecture concernant la caractérisation des ondes sismo-acoustiques et leur possible rôle dans la création du premier bang entendu. Se basant sur des données d'enquêtes sismologiques du BCSF, ils arrivent à la conclusion que, par analogie avec certains séismes, il peut apparaître « possible qu'un phénomène sismo-acoustique ait pu engendrer un « bang » sonore précurseur ».

Je dois d'abord rappeler que le formulaire collectif du BCSF, qui est soumis aux témoins de séismes, propose quatre choix (cases à cocher) pour décrire les bruits entendus : grondement faible et lointain, tonnerre proche et fort, explosion, autre. Le mot "bang" n'apparaît pas dans la liste. De plus, le BCSF reconnaît que l'expression "explosion" n'est pas parfaite et dit « On part donc de l'a priori que le terme explosion signifie un bruit fort » [1]. Inversement, et contrairement à mes commentateurs, je ne mets jamais de guillemets au mot bang, car le premier bang dont je parle a bien été reconnu et caractérisé comme tel, par exemple sur enregistrement magnétophonique. Par conséquent, et avant toute discussion proprement dite, la portée des propos de mes commentateurs doit être largement relativisée.

Outre ce problème de définition, le commentaire des auteurs souffre de deux faiblesses.

La première faiblesse vient de ce que la conjecture de nos commentateurs ne joue aucun rôle dans notre réfutation de l'explosion unique. En effet notre réfutation est fondée sur les délais entre les deux bangs entendus, indépendamment de la connaissance que nous pourrions avoir de la nature des phénomènes physiques qui les ont produits. C'est d'ailleurs un point très fort de notre argumentation. Plus précisément, le fait que tel témoin particulier ait entendu un premier bang causé par le passage de l'onde sismo-acoustique fera que son délai se situera sur la droite théorique de la thèse de l'explosion unique. Mais ce point ne peut en aucun cas invalider le fait qu'il existe bien deux séries distinctes de points sur notre Figure 1 (graphique de gauche), et donc deux phénomènes distincts. Bref, la conjecture des auteurs, à supposer qu'elle soit pertinente dans notre cas, n'est d'aucune utilité pour choisir entre les deux thèses concurrentes. Ce point semble avoir échappé à nos commentateurs, alors qu'il a été explicité dans notre article.

La deuxième faiblesse vient de ce que l'application de la conjecture à la catastrophe de Toulouse est très restreinte. En effet, nos commentateurs reconnaissent eux-mêmes qu'elle ne peut, de toute façon, s'appliquer ni à des témoins situés à plus de 10 kilomètres de l'usine AZF, ni à des témoins situés à moins d'un kilomètre. En conséquence, la conjecture aurait cette curieuse propriété de ne s'appliquer que dans un intervalle de distance. Cela la rend peu vraisemblable.

En fait, l'application de la conjecture au cas de la catastrophe de Toulouse doit nécessairement prendre en compte les informations que nous avons collectées (et qui ne sont pas de simples cases à cocher). Or ces informations nous montrent clairement que l'onde sismo-acoustique a été perçue, en plus du premier bang, comme des grondements et non comme un bang acoustique. De plus, nous n'avons aucun témoignage qui nécessiterait une interprétation non conventionnelle, c'est-à-dire en termes d'onde sismo-acoustique produisant un vrai bang acoustique. Si la conjecture des auteurs était applicable à notre cas, on aurait des témoignages relatant trois bangs nettement séparés entre eux. Ce n'est pas le cas. Le plus probable est donc que la conjecture des auteurs ne peut pas être appliquée directement aux événements étudiés. Il ne faut pas s'en étonner car nos commentateurs n'expliquent pas quel pourrait être le mécanisme physique convertissant une onde sismique en un vrai bang acoustique (parler de "couplage" n'est pas une explication).

Le reste est constitué de quelques remarques périphériques auxquelles nous répondons rapidement. Bien sûr, l'amplitude relative des deux bangs n'est pas la grandeur pertinente pour notre réfutation ; c'est le délai entre eux qui est pertinent (voir notre Figure 1). L'absence de signal sismique sur le sismogramme de l'O.M.P. serait due, selon le rapport [1] ou la note [2], au faible couplage avec le sol et/ou à une faible puissance. Ce qui reste à faire, ce n'est pas expliquer l'audibilité du premier bang jusqu'à 50 km (il s'agit d'un fait qu'on doit accepter). Ce qui reste à faire, c'est avant tout localiser la source du premier bang. Nos commentateurs insistent sur le nombre élevé de témoignages de « bruits d'explosions » reçus par le BCSF ; ils ne semblent cependant pas capables de citer un seul cas avéré d'explosion du type AZF ayant engendré deux bangs acoustiques.

En résumé, nos commentateurs se sont focalisés sur une conjecture mineure, donnée sans vraie motivation, à savoir que, par analogie avec certains séismes naturels, une explosion de surface puisse produire un bruit ressenti comme un bang. Ils n'ont pas été capables de montrer que cette éventualité s'est effectivement réalisée lors de la catastrophe de Toulouse. Et, à supposer

qu'elle se soit réalisée avec de rares témoins, cela n'aurait de toute façon aucune conséquence sur notre argumentation et nos résultats. La conclusion de notre article reste valable. Elle s'en trouve même renforcée : le premier bang entendu possède bien une source distincte de celle de l'explosion AZF.

Références

- [1] BCSF/Observations sismologiques 2000-2002, p. 102.
- [2] A. Souriau, M. Sylvander, A. Rigo, J.-F. Fels et S. Benahmed *Rapport sur les données sismologiques relatives à l'explosion sur le site de l'usine AZF de Toulouse le 21 septembre 2001* Rapport à la DRIRE, Toulouse, 26 septembre 2001, 6 p.
- [3] A. Souriau, M. Sylvander, V. Maupin, J.-F. Fels et A. Rigo *Enregistrements sismologiques de l'explosion sur le site de l'usine AZF (Toulouse, France)* C.-R. Acad. Sci. Paris, Géosciences, 334 (2002) 155-161.

Second commentaire

Reçu le 30 juin 2009.

Commentaires sur la note de A. Joets intitulée "Réfutation de l'hypothèse sismo-acoustique invoquée pour le double bang de la catastrophe de Toulouse (France) du 21 septembre 2001".

Annie Souriau, Alexis Rigo, Matthieu Sylvander

Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

tel : 33 5 61 33 29 64, fax : 33 5 61 33 29 00, Annie.Souriau@ntp.obs-mip.fr

Comments of the note by A. Joets entitled "Refutation of the seismo-acoustic hypothesis for the double bang of the 21st September 2001, Toulouse (France) catastrophe"

Dans son article [2], Joets (2009) propose de tester les deux hypothèses formulées par Souriau et al. (2002) [4, 3] concernant la perception de deux manifestations sonores lors de l'explosion de l'usine AZF à Toulouse le 21 septembre 2001 : soit il y a deux explosions distinctes à l'origine des deux manifestations sonores, soit il a pu y avoir une seule explosion couplée avec les sol, le premier son étant dû à la conversion de l'onde sismique de compression (onde P) en onde sonore à l'interface sol-air, le deuxième étant dû à l'onde acoustique. Dans le premier cas (hypothèse 1), la différence de temps entre les deux émissions sonores doit être approximativement indépendante de la distance, si l'on néglige les probables effets supersoniques au voisinage des sources, et à condition que les deux sources soient au même endroit. Dans le deuxième cas (hypothèse 2), la différence de temps entre les deux manifestations sonores doit augmenter avec la distance, ce qui résulte du fait que la propagation des ondes est plus rapide dans le sol que dans l'air.

C'est évidemment une bonne idée de chercher à tester ces deux hypothèses à l'aide d'enregistrements et de témoignages. Sans remettre en questions les observations de Joets, il nous semble cependant important d'apporter quelques précisions sur ses affirmations, et quelques réserves sur ses résultats.

La première réserve, et sans doute la plus sérieuse, concerne le lot de données

étudié. On se demande comment l'auteur, au terme d'un "long et fastidieux travail de collecte de données", n'a pu trouver que 12 témoignages dignes de confiance. Plusieurs milliers de personnes travaillent à l'est du site d'AZF, là où Joets n'a pu donner que 2 valeurs (CNES, ENAC, ENSAE, Université, laboratoires et hôpital de Rangueil, zone industrielle de Montaudran, zone industrielle de Quint-Fonsegrives, etc ...) Au sud-est, où aucun point n'est donné, se trouvent l'hôpital Larrey, l'INRA, les villes de Ramonville, Auzeville, Castanet, la zone commerciale et industrielle de Labège, etc. D'autre part, Joets n'indique pas le nombre de témoignages qui a été éliminé par rapport au nombre gardé, or c'est une information capitale. Le "long et fastidieux travail de collecte" laisse à penser qu'un grand nombre de témoignages a été collecté avant sélection, et donc qu'il y a de quoi faire sur ces données des analyses statistiques, les plus crédibles lorsqu'il s'agit de valeurs approchées et subjectives (ce qui est nécessairement le cas pour ce type d'observations). S'il y avait beaucoup de données au départ, il est clair qu'un beaucoup trop grand nombre d'entre elles a été éliminé pour que le critère de sélection reste valable. Si le nombre de données au départ était faible, c'est que le travail de collecte a été insuffisant, ou que des données ne satisfaisant pas le modèle ont été d'emblée éliminés (par exemple si le premier son n'a pas été un bang mais un grondement, suivant des témoignages que mentionne Joets, ou si un seul bang a été perçu, comme ce qu'ont rapporté des élèves en sortie géologique sur la colline de Pech David à environ 2 km à l'ESE du site d'AZF). Contrairement à ce que dit l'auteur, le résultat peut être extrêmement sensible aux données écartées dans la sélection lorsqu'on part d'une distribution statistique en nuage dans laquelle il faut discerner une tendance, et si l'on garde peu de données. Une approche statistique est d'autant plus cruciale que certains témoignages n'ont pas été rassemblés immédiatement après l'explosion, comme l'indique le "long travail de collecte" (la date de collecte aurait dû être mentionnée dans le tableau 1), et il est bien connu que les témoignages sont sujets à une variabilité importante quand le temps passe, en particulier à la suite d'un événement traumatisant.

Une deuxième série de critiques concerne les nombreux manques de rigueur ou incohérences de l'article, dont on peut s'étonner qu'ils n'aient pas été relevés par un relecteur de CR Geoscience avant publication. Par exemple, dans la Fig1 de gauche (qu'on désignera 1a) les unités ne sont pas précisées : les temps sont en secondes et les distances en mètres, avec une représentation en logarithmes népériens, alors que la représentation des distances de la figure de droite (qu'on notera 1b) est en logarithmes décimaux. Les données

sont difficilement exploitables par d'autres chercheurs : en effet, le Tableau 1 ne donne pas les informations essentielles que sont les délais estimés entre les deux bangs et leurs incertitudes (mais celles-ci peuvent être retrouvées par numérisation de la Fig. 1a). Il apparaît clairement des incohérences entre ce tableau (qui reporte 12 observations), la Fig. 1a (avec 14 valeurs, les magnétophones donnant sans doute les deux points additionnels) et la Fig. 1b (avec 16 valeurs - que sont les deux points supplémentaires?). Les enregistrements sur magnétophones (qui auraient dû être montrés) ne sont pas identifiés sur la Fig. 1 (sans doute s'agit-il des deux points situés juste entre les deux "droites sismo-acoustiques" sur la Fig. 1a?). Les délais de cinq témoignages de qualité A (d'après le tableau) et des deux magnétophones, donc 7 valeurs, devraient figurer sur la Fig. 1b (d'après la légende de la figure), or il n'y a que 5 valeurs : le délai du témoignage 3 manque, ainsi, sans doute, que celui d'un des magnétophones. Le témoignage 5 est reporté comme sismo-acoustique, alors que l'auteur indique que le témoin a perçu un bang précédant cette onde sismo-acoustique (donc le délai entre les deux bangs aurait pu être reporté). Un critère de directivité conduisant à proposer deux sources géographiquement distinctes se base uniquement sur seulement 2 points à l'est dont un seul, d'ailleurs compatible avec la courbe sismo-acoustique, est de bonne qualité (qualité A). On peut aussi se demander si un bang, perçu comme modéré au voisinage de la source (les personnes reprennent leurs activités aussitôt), peut être audible à 48 km. Enfin, pourquoi des ondes sismo-acoustiques seraient-elles à basse fréquence, comme le dit Joets dans sa conclusion? Leur nature va évidemment dépendre du contenu fréquentiel de l'onde sismique générée à la source, de la loi d'atténuation dans le sol et de la distance [1, 5, 6].

Enfin, lorsqu'on se base sur le travail d'autres auteurs, on se doit de rapporter et d'utiliser ce travail avec exactitude et rigueur. Par exemple, les auteurs de [4] n'ont donné aucune information sur la durée des "bangs", contrairement à ce que rapporte Joets dans son introduction, sans préciser d'où il tient ces valeurs. Ils n'ont émis qu'une hypothèse de travail avec un critère pour la tester, contrairement à ce qu'affirme le résumé anglais. De plus, dans [4], les auteurs ont donné la vitesse apparente des ondes enregistrées à l'OMP à 4.2 km de la source de l'explosion ($v=2.7$ km/s pour la première arrivée, $v=1.8$ km/s pour l'onde tardive horizontale, qui donc ne peut être à l'origine d'un son), mais ils n'ont pas donné de valeur valable à toute distance, ce que sous-entend l'utilisation qu'en fait Joets. Par ailleurs, Joets s'appuie (Fig. 1a) sur un document non public [3] dans lequel les auteurs donnent la différence

de temps approximative (croissante linéairement avec la distance) attendue entre les deux sons dans l'hypothèse 2, pour des distances comprises entre 0 et 6 km. Joets extrapole la droite jusqu'à 60 km ($\ln(l)=11$), sans préciser le domaine de validité donné par les auteurs (0-6 km). Mentionnons ici que cette extrapolation est évidemment fautive, par suite de la stratification du sol et de l'augmentation des vitesses avec la profondeur.

Sans remettre en question les quelques témoignages reportés dans l'article de Joets, ni prendre un quelconque parti concernant l'interprétation des manifestations sonores perçues lors de l'explosion de l'usine AZF, nous pensons que le nombre très réduit des témoignages, leur collecte tardive, leur mode de sélection peu explicite, ainsi que le manque de rigueur et les nombreuses imprécisions et incohérences de l'article, affaiblissent considérablement la pertinence des conclusions présentées.

Références

- [1] D.P. Hill, F.G. Fischer, K.M. Lahr, J.M. Coakley, Earthquake sounds generated by body-wave ground motion , Bull. Seismol. Soc. Am., 86 (1976) 1159–1172.
- [2] A. Joets, Réfutation de l'hypothèse sismo-acoustique invoquée pour le double bang de la catastrophe de Toulouse (France) du 21 septembre 2001, C. R. Geosciences (2009) 306-309.
- [3] A. Souriau, M. Sylvander, A. Rigo, J.-F. Fels, S. Benahmed, Rapport sur les données sismologiques relatives à l'explosion sur le site de l'usine AZF de Toulouse le 21 septembre 2001, Rapport pour la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) de Midi-Pyrénées, Toulouse (2001) 6 pp.
- [4] A. Souriau, M. Sylvander, V. Maupin, J.-F. Fels, A. Rigo, Enregistrements sismologiques de l'explosion sur le site de l'usine AZF (Toulouse, France), C. R. Geosciences, 334 (2002) 155-161.
- [5] M. Sylvander, D.G. Mogos, The sound of small earthquakes : Quantitative results from a study of macroseismic bulletins, Bull. Seismol. Soc. Am. 95 (2005) 1510-1515.

- [6] M. Sylvander, C. Ponsolles, S. Benahmed, J.-F. Fels, Seismoacoustic recordings of small earthquakes in the Pyrenees : Experimental results, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97 (2007) 294-304.

Ma réponse au second commentaire

Envoyé le 30 juillet 2009.

Le commentaire qui m'est adressé provient des trois sismologues auteurs de la thèse de l'explosion unique, telle qu'elle est exprimée dans leur rapport [1] (avec J.-F. Fels et S. Benahmed) et dans leur note [2] (avec V. Maupin et J.-F. Fels). Il suggère par toute une série (de longueur inhabituelle) de "précisions et de réserves" que notre réfutation présenterait des défauts de forme.

Nos commentateurs commencent par présenter les deux thèses concurrentes : leur thèse de l'explosion unique et la thèse attribuant les deux bangs entendus par la population à deux sources S_i , $i = 1, 2$, acoustiquement indépendantes. Nos commentateurs parlent alors de "deux explosions", ce qui n'est pas rigoureux car dans ce dernier cas on ne connaît pas la cause du premier bang. Plus important est ce qu'ils écrivent sur « la différence de temps (notée ici τ) entre les deux émissions sonores ». Ils affirment que τ est "approximativement indépendante de la distance", moyennant deux conditions sur les effets supersoniques et sur la position relative des deux sources. Or la durée τ est une donnée de base du problème, définissant la chronologie des deux émissions sonores. C'est pourquoi, cette grandeur ne peut dépendre d'aucune distance, ni d'aucun effet supersonique, ni d'aucune position relative des sources.

D'autre part, lorsqu'il y a deux sources acoustiques, la durée Δ entre les deux bangs perçus par un témoin dépend, elle, de la position du témoin par rapport aux deux sources. En imposant $S_1 = S_2$, comme le font nos commentateurs, on fausse donc l'interprétation des différentes valeurs de Δ recueillies par témoignage ou par appareil enregistreur (pour plus de détails, voir notre discussion de la Figure 1 de [3]).

Mes commentateurs s'étonnent du faible nombre de témoignages présentés. En fait, comme nous l'avons expliqué dans notre article, nous en disposons de bien plus, tous cohérents. Les 12 données présentées suffisent à notre démonstration. En effet, il suffit de 3 points pour invalider la thèse de l'explosion unique : 1 point sur la courbe "sismo-acoustique" et 2 points nettement hors de cette courbe, donnant ainsi une idée du minimum et du maximum de Δ (données fondamentales du problème). Les autres points de la Figure 1 de [3] sont des points de confirmation.

Le rapport du nombre de témoignages gardés sur celui des témoignages

éliminés est sans intérêt dans notre étude.

Le problème traité ne relève pas de la statistique car il est par essence déterministe, l'indétermination provenant uniquement de l'incertitude des mesures (voir Figure 1 de [3]). Faire des moyennes aurait détruit toute l'information pertinente contenue dans les témoignages. Le but n'est pas de "discerner une tendance", mais de savoir si la thèse de l'explosion unique est vraie ou fausse.

Nos résultats ne sont pas sensibles aux données écartées (voir notre discussion dans [3]).

Comme exemple de "manque de rigueur" et d'"incohérence", nos commentateurs citent notre Figure 1a, où : « les unités ne sont pas précisées : les temps sont en secondes et les distances en mètres. » Reproche non fondé, puisque la Figure 1 utilise les logarithmes qui sont des nombres sans dimension, et puisque nos distances sont correctement exprimées en mètres (abréviation m) dans le Tableau 1. Ils poursuivent leur critique de la Figure 1 en me reprochant d'avoir, de façon "incohérente", utilisé les logarithmes népériens pour la Figure 1a, et les logarithmes décimaux pour la Figure 1b. Ils commettent une erreur, car ces figures utilisent toutes les deux les logarithmes népériens. En fait, la Figure 1b ne changerait pas si nous avions utilisé, au lieu des logarithmes népériens, les logarithmes décimaux, ou même des logarithmes de base quelconque a ($a > 1$). Cela résulte de la définition de la fonction logarithme de base a (voir par exemple [4, 5]). On s'en convaincra grâce à la figure que nous donnons ici (Fig. 1), où les deux représentations de la Figure 1b de [3] ont été produites par la même routine graphique, l'une en utilisant les logarithmes népériens (à gauche) et l'autre en utilisant les logarithmes décimaux (à droite). C'est donc sans aucune justification que nos commentateurs jettent le doute sur le sérieux des rapporteurs de notre article, à qui cette invariance n'a pas échappé.

Nos commentateurs jugent nos données "difficilement exploitables". Ces données, qui sont présentées et exploitées ici dans le cadre de notre réfutation, seront à nouveau exploitées dans la suite de nos travaux (publication en préparation).

Les enregistreurs n'apparaissent pas dans le Tableau 1 car il est consacré aux témoins. La présentation des audiogrammes est inutile pour notre démonstration. Les deux points supplémentaires de la Figure 1b sont deux enregistreurs. Les délais de la Figure 1b font référence aux témoignages humains (voir notre texte). Concernant le "témoignage 5", il est de qualité A relativement à la perception de l'onde sismo-acoustique, mais il ne donne qu'une

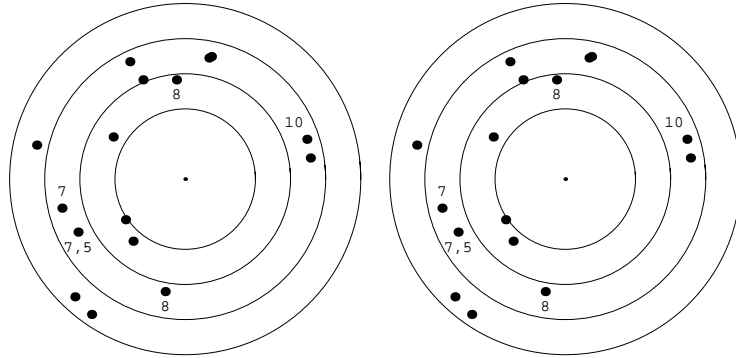


FIG. 1 – Le graphique de gauche, extrait de notre article, utilise les logarithmes népériens. Le graphique de droite montre comment il serait apparu si l'on avait utilisé les logarithmes décimaux.

durée rétrospective (voir notre discussion).

Notons que la localisation de la source du premier bang, trouvée à l'est du cratère, ne dépend pas du fait qu'il existe ou non des témoins situés à l'est du cratère.

A propos du parcours et des fréquences du premier bang, il ne faut partir que de faits dûment constatés. Quand un fait est avéré, la question de sa possibilité ne se pose plus.

Concernant les durées des bangs, la référence [2] apparaît à trois endroits dans mon article (en introduction, au critère des délais, et pour la valeur de v) sans qu'il y soit question de durées de bangs. Indiquons en passant que la durée des bangs a été connue dès leur divulgation. Le résumé anglais dit simplement que le critère des auteurs de [2] (croissance linéaire de Δ en fonction de la distance) traduit l'hypothèse sismo-acoustique. Remarquons que nos commentateurs écrivaient dans [1] (rapport à la DRIRE) « les premiers témoignages recueillis favorisent l'interprétation de deux "bangs" dûs à une seule explosion » (souligné par les auteurs). Rien de plus n'est dit sur ces "premiers témoignages", lesquels ont d'ailleurs disparu dans leur note [2]. Le document "non public" dont parlent mes commentateurs est leur rapport [1] qui fait partie du dossier scientifique puisqu'il est référencé dans leur note [2]. Il ne constitue nullement la base de mon travail, et encore moins sa partie sur les différences de temps car elles y sont indiquées "approximativement". Je n'ai donc pas à "préciser le domaine de validité donné par les auteurs".

Ce domaine de validité est d'ailleurs sans intérêt car j'ai expliqué dans ma discussion que la prise en compte de la variation de la vitesse sismique à l'échelle régionale ne fait que renforcer mon argument.

Au bilan, nos commentateurs ont émis des réserves, provenant ou bien d'une interprétation erronée du problème (durée τ , statistiques, logarithmes, etc) ou bien d'une lecture trop rapide de notre note (valeurs des vitesses, références, etc). La portée de leurs réserves s'en trouve très affaiblie. Ils n'ont pu remettre en cause notre réfutation. Ils n'ont rien pu trouver de nouveau en faveur de leur hypothèse de l'explosion unique, telle qu'elle est exprimée dans leur rapport à la DRIRE [1]. Celle-ci doit donc être définitivement mise de côté. La conclusion de notre article reste valable. Elle s'en trouve même renforcée : le premier bang entendu possède bien une source distincte de celle de l'explosion AZF.

Références

- [1] A. Souriau, M. Sylvander, A. Rigo, J.-F. Fels et S. Benahmed *Rapport sur les données sismologiques relatives à l'explosion sur le site de l'usine AZF de Toulouse le 21 septembre 2001* Rapport à la DRIRE, Toulouse, 26 septembre 2001, 6 p.
- [2] A. Souriau, M. Sylvander, V. Maupin, J.-F. Fels et A. Rigo *Enregistrements sismologiques de l'explosion sur le site de l'usine AZF (Toulouse, France)* C.-R. Acad. Sci. Paris, Géosciences, 334 (2002) 155-161.
- [3] A. Joets, *Réfutation de l'hypothèse sismo-acoustique invoquée pour le double bang de la catastrophe de Toulouse (France) du 21 septembre 2001*, C. R. Geoscience 341 (2009) 306-309.
- [4] J. Lelong-Ferrand et J.-M. Arnaudiès *Cours de Mathématiques - Tome 2, Analyse* Dunod, 1976.
- [5] J.-L. Boursin *Les Maths* Editions Générales First, 2005.