

LES DIVERS PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR UNE EXPLOSION SOUS-MARINE. LEUR ASPECT ÉNERGÉTIQUE EN MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE

par le Cdt L. GRINDA

RÉSUMÉ

Il est dressé une synthèse concise de l'ensemble des phénomènes qui se produisent au cours d'une explosion sous-marine et dont la plupart ont été décrits séparément dans diverses publications. Il en est un cependant qui a été observé récemment à Monaco et qui est analysé pour la première fois. Il consiste en la concentration de l'énergie des ondes de pression ou des ondes vibratoires près du rivage et en son passage dans le sol sous forme de choc après une propagation canalisée entre le fond et la surface.

Dans le cas de la Méditerranée occidentale dont la topographie et les chenaux sonores sont connus il est donné un aperçu de la répartition de l'énergie entre les divers phénomènes décrits.

INTRODUCTION

Des explosions sous-marines sont fréquemment utilisées pour des travaux d'océanographie et de séismologie comme source d'ondes acoustiques ou d'ondes de pression de haut niveau d'énergie. On ne retient généralement qu'un schéma géométrique très simple de la propagation de ces ondes et on néglige ainsi délibérément de nombreux phénomènes que l'on croit secondaires et qui, en réalité, dans certains cas sont prépondérants. En outre bien souvent les observations s'accordent mal avec ce schéma et on découvre alors qu'une explosion sous-marine n'est pas une source ponctuelle de durée extrêmement courte et que le champ de pression qu'elle crée dans la mer comme dans les milieux environnants est extrêmement complexe.

Afin de faciliter la tâche des utilisateurs d'explosions sous-marines nous avons entrepris de faire le bilan pratique de nos connaissances sur ce sujet en songeant particulièrement au domaine de la Méditerranée occidentale. Nous révélerons à cette occasion quelques-unes de ces connaissances acquises récemment à Monaco.

Déroulement d'une explosion sous-marine.

Quand une charge placée à une certaine profondeur explose la détonation se propage d'abord dans l'explosif sous la forme d'une onde à peu près sphérique à la vitesse de 6 000 m/s environ. Elle dure quelques dizaines de microsecondes pendant lesquelles l'explosif est transformé en gaz à haute température, 3 000° environ, et à très forte pression pouvant atteindre 50 000 atmosphères.

Lorsque l'onde de détonation atteint la surface de la charge elle donne naissance à une onde de choc qui se propage dans l'eau en emportant une fraction importante de l'énergie développée par l'explosion.

Les gaz dégagés par l'explosif forment une bulle dont le rayon croît quand les gaz se détendent. Ce rayon dépasse la valeur correspondant à la pression hydrostatique locale étant donné l'énergie cinétique communiquée à l'eau environnante. Il passe par un maximum, puis décroît et la bulle exécute ainsi un certain nombre d'oscillations.

Le centre de gravité se déplace en même temps vers le haut et les pulsations cessent quand toute l'énergie mise en jeu est dissipée ou que la bulle crève en surface.

A chaque minimum étant donné le changement rapide du sens du mouvement une onde de pression secondaire est émise et se propage dans l'eau en suivant les lois de l'acoustique. Les amplitudes de ces ondes successives décroissent très rapidement.

Une donnée qui nous paraît importante est le temps qui sépare l'onde de choc et les ondes de pression secondaires. Le Professeur WEIBULL a proposé une formule pour le calculer : il est équivalent à la période de pulsation de la bulle. Il est de 1 seconde pour une charge de 1 tonne tirée à la profondeur de 30 mètres.

Entre l'émission de l'onde de choc et la naissance des ondes de pression secondaires, des ondes sonores et ultra-sonores se répandent autour de la bulle. On les voit nettement sur un oscillogramme obtenu par une caméra ultra-rapide.

En eau libre l'onde de choc et les ondes de pression secondaires sont à peu près sphériques si la charge n'est pas allongée. Leur vitesse de propagation est celle du son dans la mer. Pour l'onde de choc ceci n'est vrai qu'à partir d'une distance égale à 15 fois le rayon de la charge.

En surface on observe généralement les phénomènes suivants :

1^o) Sur la verticale de la charge l'arrivée de l'onde de choc se manifeste par un frémissement circulaire de la nappe d'eau.

2^o) Une intumescence ayant la forme d'un dôme d'écume se produit. Sa hauteur croît jusqu'à ce que la bulle crève en projetant l'eau sous la forme d'une gerbe très spectaculaire. Il peut arriver que la bulle ne crève pas et qu'il n'y ait pas de gerbe.

Dans le bulletin n^o 1104 de l'Institut océanographique nous avons décrit les caractéristiques de l'onde de choc et des ondes de pression secondaires ainsi que celles de l'intumescence et de la gerbe en fonction de la charge, de la profondeur, de l'explosion et du temps, de la distance. Nous ne pouvons les rappeler ici ; cependant nous devons insister sur quelques points essentiels.

L'onde de choc, si on la représente par une courbe de pression en fonction du temps présente :

un front raide d'une durée inférieure à une microseconde ;

une pression maximum très forte et une décroissance de cette pression quasi exponentielle.

Par contre les ondes de pression secondaires n'offrent aucun front raide de pression. Les pressions croissent et décroissent relativement lentement. Quant aux ondes acoustiques quand on les examine sur un oscillogramme elles donnent l'image d'un chaos où il est certain que l'on trouve toutes les gammes de fréquences sonores et ultra-sonores sans qu'il soit possible d'établir celles qui sont privilégiées.

Bilan énergétique.

Les auteurs qui ont traité du difficile problème de la répartition de l'énergie entre l'onde de choc, les ondes de pression et les ondes acoustiques ont proposé des chiffres très discordants. Nous en avons cité quelques-uns dans le travail précité. On peut en tirer cependant certaines conclusions approximatives.

1) L'énergie transportée par l'onde de choc serait du même ordre de grandeur mais un peu inférieure à celle qui correspondrait au déplacement en masse de l'eau d'une part et aux ondes de pression secondaires d'autre part.

2) L'énergie dissipée en ondes acoustiques et en pertes diverses serait pour les uns de 10 % pour les autres de 20 à 30 %.

Ce qu'il faut en retenir c'est que l'onde de choc agit en toutes circonstances près de la surface comme près du fond, de la même manière en transportant la même énergie tandis que par la pulsation de la bulle l'énergie emmagasinée par le milieu marin augmente avec la profondeur de la charge jusqu'au point où la gerbe et l'intumescence disparaissent complètement. A cette profondeur toute l'énergie de la bulle est transférée aux ondes de pression secondaires et elle est *supérieure à celle de l'onde de choc*. De plus ses effets se manifestent par des ondes sismiques de fréquences différentes. On peut donc critiquer la confusion que l'on fait habituellement entre ces sources de caractéristiques dissemblables et qui se suivent dans le temps.

Le sort des ondes de pression pendant leur propagation.

Il nous faut examiner maintenant ce que deviennent ces diverses ondes de pression au cours de leur propagation car elles rencontrent le fond de la mer, la surface et dans la mer même des conditions de propagation qui ne cessent pas de varier.

Pour cela nous considérerons les divers secteurs de propagation et nous admettrons que les ondes de pression sont sphériques et l'on peut parler en la circonstance de rayons sonores issus du centre de la charge, ce qui peut se justifier parce que les longueurs d'onde sont faibles comparées aux dimensions des étendues plates qui constituent la surface, le fond et le talus continental. Nous négligeons ainsi les phénomènes de diffraction qui existent mais qui sont du second ordre.

Dans chacun de ces secteurs le mode de propagation sera généralement le même pour tous les types d'ondes. Les facteurs qui le détermineront seront la température, la salinité, la profondeur, la topographie des fonds sous-marins et leur structure.

Nous ne nous occuperons dorénavant que de la Méditerranée occidentale et spécialement de sa limite nord.

Le 1^{er} secteur. Il concerne les rayons venant au contact du fond et qui pénètrent dans le socle cristallin en donnant naissance à des ondes sismiques qui se propagent ensuite selon des lois connues.

Ces rayons rencontrent d'abord de la vase, puis des sédiments qui se consolident de plus en plus avec la profondeur, enfin le socle cristallin qui est soit du granite, soit du basalte.

A la surface de séparation de chacun de ces divers milieux ces rayons donnent naissance à des rayons réfractés et à des rayons réfléchis. Il faut rappeler que l'énergie réfléchie est d'autant plus importante que les résistivités acoustiques des deux milieux sont différentes. De l'ordre de 4 % pour un fond de vase elle est de l'ordre de 60 % pour un fond de granite. Si un fond de vase recouvre un fond de granite elle est toujours de 4% pour l'écho sur la vase, mais de 40 % pour l'écho sur le granite. Il peut donc arriver que ce dernier masque l'écho sur la vase et c'est une sonde fausse qui est alors lue sur un sondeur.

Ainsi donc quand les rayons pénètrent dans le socle cristallin l'énergie qu'ils y véhiculent n'est guère supérieure à la moitié de celle des rayons incidents dans l'eau.

Le secteur de ces rayons est défini autour de la verticale par les rayons incidents qui une fois réfractés raseront la surface séparant le socle des sédiments, qui seront donc en général horizontaux.

L'incidence limite de ces rayons est $16^{\circ}2$ pour un socle de granite et de $12^{\circ}4$ pour un socle basaltique. Donc la fraction de l'énergie de la charge destinée à ce secteur est égale à $(2 \times \text{incidences limites})/360$ soit 9 % pour un socle granitique et 7 % pour un socle de basalte. Une partie de cette énergie est dissipée dans l'eau et les sédiments par absorption, par réflexion et par interférences entre ondes de pression secondaires incidentes et ondes de choc réfléchies.

Le 2^e secteur. Nous conviendrons de l'opposer au premier en le définissant par les rayons qui prolongent vers le haut ceux du premier. Ces rayons viennent se réfléchir totalement à la surface en subissant un changement de phase de 180° ce qui crée des ondes de distension et par conséquent une cavitation. Celle-ci se manifeste par la formation de petites bulles que l'on voit dans l'intumescence et le dôme d'écume. L'onde de choc réfléchie perd donc de ce fait de l'énergie. De plus elle peut interférer avec les ondes de pression secondaires qui viennent après. Elle atteint le fond comme l'onde directe mais elle est en opposition de phase. Elle s'y comporte de la même façon.

On peut donc dire qu'au total 18 % si le socle est granitique et 14 % si le socle est basaltique de l'énergie de la charge sont destinés *en principe* aux rayons séismiques prenant naissance à la verticale de la charge et se diffusant dans le globe terrestre, mais comme une partie importante se dissipe avant d'atteindre le sol, en effet de cavitation, d'absorption, de réflexion et d'interférence il ne paraît guère probable que l'énergie répandue effectivement dans la croûte terrestre et le manteau dépasse 6 % de celle de la charge.

Le 3^e secteur. Très important par ses propriétés. Il comprend les rayons qui relèvent du chenal sonore existant autour de la charge. Commandés par la distribution verticale de la vitesse du son dans la mer, dans nos régions les chenaux sonores oscillent entre deux types limites.

Le type d'hiver qui correspond à un gradient de vitesse positif et presque constant surtout aux profondeurs supérieures à 150 mètres. Dans ce cas le chenal sonore est défini par le rayon extrême orienté vers le bas et venant tangenter le fond et par le rayon extrême orienté vers le haut et tel qu'après réflexion totale à la surface il vienne tangenter le fond.

Le type d'été est conforme au chenal sonore classique caractérisé par un gradient d'abord négatif jusqu'au point de vitesse minimum et par un gradient positif ensuite. Il est défini par le rayon qui, orienté vers le haut, vient tangenter la surface et par celui qui, orienté vers le bas, vient tangenter le fond.

On convient souvent d'appeler l'angle d'ouverture du chenal l'angle séparant ces deux rayons extrêmes. Il est de 24° environ en hiver comme en été dans nos régions mais la qualité du chenal sonore ne cesse de croître de l'hiver à l'été. C'est donc 12 % de l'énergie de la charge qui est propagée dans le chenal sonore selon des chemins plus ou moins sinueux sans autre déperdition que celle qui résulte de l'absorption et en hiver des réflexions sur une mer rugueuse.

Dans ce chenal l'énergie diminue en moyenne en raison inverse de la distance aussi est-elle portée à des distances considérables comparées aux portées des rayons séismiques propagés dans le globe terrestre et ayant la même origine.

Cependant si le flux d'énergie se conserve dans le guide d'ondes créé par le fond et la surface, à l'intérieur de ce chenal sonore le champ de pression peut varier énormément entre des points voisins puisqu'il y existe des zones de silence et des lignes focales qui apparaissent périodiquement.

Ces lignes focales dépendent des gradients de vitesse mais pour de grandes épaisseurs d'eau le gradient positif moyen qui succède au gradient négatif tend vers le gradient créé par la profondeur, c'est-à-dire par la compression de l'eau. Ce terme essentiel du gradient positif est quasi constant dans tous les océans aussi les lignes focales sont assez semblables dans tous les chenaux sonores sous-marins. Affectant la forme des deux côtés d'un angle aigu elles pourraient à peu près se déduire de la première par une translation horizontale de 600 à 800 mètres.

Cette focalisation est en relation avec une autre propriété que les océanographes comme les géophysiciens doivent bien connaître : la déformation des signaux émis à l'origine du chenal.

On peut le montrer par le calcul du trajet acoustique, au sens du principe de Fermat, des rayons extérieurs et des rayons rectilignes qui suivent l'axe du chenal. Dans les traités on établit facilement que le trajet acoustique le plus long est celui du rayon rectiligne, qui, géométriquement est cependant le plus court.

Ainsi un son très bref émis à la source serait entendu à l'extrémité du chenal comme un son qui s'établirait doucement, augmenterait d'intensité et s'arrêterait assez rapidement. Si à la source un train d'ondes entretenues d'une grande durée est émis c'est une série de maxima espacés de silence relatif que l'on perçoit et cette série a la périodicité de l'ordre de la 1/2 seconde. C'est la succession dans le temps des focales pour un rayon déterminé. C'est ce que l'on observe dans les enregistrements des ondes T qui sont des rayons séismiques propagés dans un chenal sonore sous-marin et qui ont tant intrigué les séismologues depuis leur découverte, il n'y a guère plus de 20 ans.

Le cas du son très bref est à serrer d'un peu plus près car dans la pratique il est très important. En effet le repérage par le son dans la mer se fait souvent en mesurant l'écart de temps séparant l'émission de la réception du signal et on en déduit la distance grâce à la connaissance de la vitesse du son. Comme le signal reçu a une certaine durée on ne sait comment mesurer cet écart. En fait ce qui est net dans le signal reçu est l'extinction assez brusque survenant après le maximum d'intensité. Si l'on est dans l'axe du chenal cette extinction correspond à la propagation à la vitesse minimum. Ceci reste encore vrai si l'on ne s'écarte pas trop de l'axe du chenal, c'est-à-dire en Méditerranée occidentale entre les profondeurs de 50 et 150 mètres encore faut-il rappeler que les hétérogénéités du milieu marin peuvent ne pas faire apparaître cette extinction comme parfaitement nette. Aussi la précision de ce procédé de repérage ne doit pas être surestimée.

Enfin le 4^e secteur. Il comprend tous les autres rayons.

Les plus proches de la verticale vont pénétrer dans les sédiments soit directement, soit après réflexion à la surface ce qui aura pour effet de les atténuer. Aux incidences les plus faibles ces rayons seront réfractés dans les couches les plus consolidées et les plus profondes, l'incidence limite étant définie par la vitesse de propagation dans la couche considérée.

Pour des incidences croissantes la réfraction n'est possible que dans les couches où les vitesses sont de plus en plus faibles. Le rayon qui n'est pas réfracté est réfléchi totalement.

Les rayons réfractés et réfléchis sur les diverses surfaces de séparation des sédiments vont ressortir dans la mer et y créeront un champ de pression que les séismologues étudiant la structure du fond mesurent avec des hydrophones ou des géophones posés sur le fond.

Les rayons qui sont réfléchis totalement sur le fond sont ensuite réfléchis totalement à la surface. Ce cycle recommence jusqu'à épuisement de l'énergie de ces rayons ce qui arrive plus ou moins vite selon les qualités réfléchissantes du fond. Si le fond est vaseux cette extinction survient très tôt. Si le fond est très dur ces rayons peuvent se propager assez loin et le champ qu'ils créeront se superposera à celui des rayons du chenal sonore mais avec un sensible retard.

La fraction d'énergie qui est requise par le 4^e secteur est relativement forte (70% environ). La part qui pénètre dans les sédiments varie avec leur consistance et ne peut donc s'évaluer à priori. Ce qui est sûr c'est que l'absorption dans les sédiments est grande. Aussi les rayons qui reviennent dans la mer après réfraction dans les sédiments créent un champ de niveau toujours faible comparé au champ provenant des rayons directs.

Il nous faut maintenant nous intéresser au sort des rayons qui par le chenal sonore ou par réflexions totales successives viennent buter sur le talus continental.

En Méditerranée occidentale ce talus bien que relativement abrupt a une pente moyenne assez faible : 6° environ. Les rayons s'y présentent donc avec des incidences très supérieures à l'incidence limite ce qui entraîne leur réflexion totale suivie d'une réflexion totale à la surface. A chaque cycle de double réflexion totale l'incidence diminue aussi après quelques cycles l'incidence limite est atteinte et les rayons pénètrent dans le fond.

Au cours de ces réflexions successives les rayons se seront rapprochés de la ligne du rivage où une concentration d'énergie se sera opérée et leur passage dans le sol s'effectuera sous forme de choc, non instantané mais d'une certaine durée. C'est ce qui s'observe à Monaco sur les séismogrammes chaque fois qu'une explosion sous-marine a lieu au large.

La durée de propagation confirme toujours ce schéma et les amplitudes sont toujours spectaculaires eu égard au poids de la charge et de la distance.

Cependant on pouvait se demander quelle était l'importance de l'énergie qui passait ainsi dans le sol près du rivage, l'amplitude des ondes détectées à Monaco très près de la mer n'étant pas un indice suffisant. La réponse à cette question a été donnée par les enregistrements faits à Monaco et à Isola, situé à 60 kilomètres de la côte monégasque, d'une série d'explosions exécutées en juin 1962 au milieu du canal Corse-Provence.

En effet à Isola apparaissaient les ondes classiques engendrées à la verticale de la charge puis avec des amplitudes supérieures les ondes provenant du littoral proche de Monaco et qui sur les séismogrammes de Monaco présentaient un aspect étonnant. Le rapport des amplitudes relevées à Isola entre ces deux arrivées de trains d'ondes était selon les explosions de 2,5 à 1,0. C'était donc la preuve de la très forte énergie qui arrive près du rivage et pénètre dans le fond de la mer en donnant naissance à des ondes parasites plus puissantes que les ondes principales au-delà de la côte, vers le continent.

Ce phénomène peut avoir des conséquences très importantes en séismique sous-marine puisque si la côte est distante de quelques kilomètres de la charge ces ondes parasites peuvent interférer avec les ondes classiques réfractées ou réfléchies. C'est toute l'interprétation des enregistrements qui est compromise si l'on ignore l'existence de ces ondes parasites et l'instant de leur naissance.

Une autre conséquence de ce trajet des rayons passant dans le continent près du rivage est la réflexion d'une partie de leur énergie ce qui donne lieu à des rayons suivant un chemin inverse. C'est ce qui a été observé au cours d'une expérience exécutée dans le golfe de Giens ou un signal de forte amplitude ne pouvait s'interpréter en fait que par le cheminement qui vient d'être décrit.

En conclusion il faut rappeler aux expérimentateurs que toute mesure de champ de pression dans la mer ou près de la mer suppose au préalable une analyse de tous les phénomènes qui viennent d'être décrits en fonction des conditions locales.

D'autres phénomènes peuvent se produire mais ils sont imprévisibles, tels la présence de fines bulles gazeuses au sein des masses d'eau, l'éparpillement de matières solides assez nombreuses pour créer de la diffusion et surtout l'abondance de la vie qui prend souvent les formes les plus évanescentes. C'est dire que dans l'étude du milieu marin, même par les physiciens, il subsiste toujours une part de mystère.

Musée océanographique. Monaco.