

Les effets pathologiques des explosions sous l'eau

par P. VALADE

Les effets pathologiques des explosions à l'air libre sont connus et ont été bien étudiés, il n'en est pas de même de ceux des explosions sous l'eau. Et cependant, de nombreux auteurs, tels que C. WAKELEY et P. GALA considèrent les effets explosifs sous l'eau comme beaucoup plus dangereux et estiment que, durant la dernière guerre, ils ont à leur actif un nombre plus élevé de victimes que les explosions à l'air libre. Il est hors de doute que dans un conflit futur, la généralisation des opérations dites « amphibies » augmenterait dans une proportion encore plus forte le nombre des pertes dûes à cette cause morbide, d'où l'intérêt qui s'attache à cette étude.

Les phénomènes physiques des explosions sous l'eau

Laissant de côté les phénomènes physiques des explosions à l'air qui ont été exposés ailleurs (1), nous résumerons les caractéristiques des phénomènes physiques des explosions sous l'eau en faisant ressortir les particularités qui les différencient des explosions à l'air libre.

Lorsqu'un explosif détone sous l'eau, il donne naissance, comme dans l'air, à une *onde de choc* qui entraîne avec elle la moitié environ de l'énergie libérée par l'explosion. Cette onde de choc se combine avec la *poussée* développée par les gaz de l'explosion, lesquels forment une énorme *bulle* qui repousse devant elle l'eau (cette bulle représente environ 30.000 fois le volume de l'explosif), mais l'eau réagit à son tour en comprimant violemment la bulle de gaz et en la ramenant presque à son volume initial; à ce moment, nouvelle poussée de la bulle et ainsi de suite, de telle sorte qu'il se produit une série d'oscillations jusqu'à ce que la bulle, en montant, finisse par crever la surface de l'eau qu'elle projette avec plus ou moins de violence autour d'elle.

Il convient de distinguer deux cas.

Premier cas. — La charge est trop faible et immergée à une trop grande profondeur pour que la bulle émerge avant d'avoir atteint son diamètre maximum.

(1) P. VALADE. Les effets pathologiques des explosifs. *Revue vétérinaire militaire*, t. III.

Dans ce cas, l'onde de choc et la poussée de l'eau combinées provoquent à la surface de l'eau une sorte d'intumescence blanche en forme de *dôme* qui disparaît *sans qu'aucune gerbe n'apparaisse*.

Un certain temps après, la bulle finit par émerger en provoquant un rejaillissement d'écume à plus faible hauteur. Cette bulle de gaz a généralement la coloration noire des gaz produits par la détonation de la mélinite ou de la tolite.

Deuxième cas. — La charge est suffisamment forte et la profondeur de l'eau assez faible pour que la bulle émerge avant d'avoir atteint son diamètre maximum.

Dans ce cas, la bulle soulève violemment l'eau qui se trouve au-dessus et la projette à une grande *hauteur* dans l'air, donnant lieu à l'apparition d'une gerbe (« plume » des Anglo-Saxons), d'autant plus élevée que la charge est plus forte, la bulle apparaît après et éclate latéralement à la base de la gerbe.

Tout ce que nous venons de dire ne concerne que le côté spectaculaire du phénomène. Examinons maintenant les faits qui différencient essentiellement les explosions sous l'eau des explosions dans l'air :

a) Par rapport à l'air, l'eau est un fluide d'une faible compressibilité et d'une densité plus grande, il s'ensuit que l'impulsion propagée à l'eau par l'onde de choc agira avec une intensité encore plus grande que dans l'air ;

b) Relativement aux *distances*, on peut poser la règle approximative suivante : la pression maximum varie *inversement à la distance*, tandis que dans l'air, cette même pression varie *inversement au carré de la distance*;

c) Enfin, dans les explosions sous l'eau, interviennent des phénomènes de *réflexion* sur le fond et à la *surface* de l'eau, c'est-à-dire à la limite de séparation des deux fluides, au delà des limites du *dôme*.

Un appareil sensible comme un piézomètre enregistrera donc d'abord *l'onde directe* dont le trajet est plus court, puis ensuite *l'onde réfléchie*, séparées par un intervalle de temps correspondant à la différence entre les deux trajets, effectués à la vitesse du son dans l'eau. Mais il y a lieu de remarquer que l'eau étant un fluide plus dense que l'air, la réflexion a lieu avec *changement de signe*, c'est-à-dire que l'onde réfléchie est non plus une onde de surpression, mais une onde de décompression, elle coupera donc l'onde de choc directe.

Tels sont, brièvement résumés, les phénomènes physiques

développés par les explosions sur l'eau, il devient alors facile de comprendre l'action *morbide* qu'ils peuvent exercer sur des *êtres vivants et en particulier sur l'homme*.

A la vérité, et à la suite des observations retenues lors du dernier conflit, cette question a préoccupé les milieux militaires et navals de toutes les nations et a suscité un certain nombre d'*études expérimentales*. Il n'entre pas dans nos vues de faire un historique de ces diverses études, effectuées surtout dans les pays Anglo-Saxons. Il s'agit dans la plupart des cas d'expérimentations à l'échelle du laboratoire portant sur de petits animaux immergés dans des bassins de dimensions réduites.

Au contraire, les expériences auxquelles il nous a été donné de prendre part ont mis en œuvre de grosses charges d'explosifs, dans un grand fleuve (1), elles revêtent donc, à notre avis, une importance majeure, justifiant la présente relation avec l'espoir qu'elle intéressera votre savante Compagnie.

Pour des raisons de discrétion faciles à comprendre, nous ne donnerons aucune indication de *chiffres*, tant sur les charges d'explosifs expérimentées que sur les résultats obtenus relativement à la détermination des rayons d'action mortelle et morbide, de l'influence de la profondeur de la charge et aussi des variations de pressions correspondant à une action mortelle.

Nous étudierons successivement :

- 1° le dispositif de mise en place des animaux;
- 2° l'anatomo-pathologie ;
- 3° la symptomatologie et la clinique;
- 4° essai de pathogénie ;
- 5° les enseignements thérapeutiques des expériences.

1° Dispositif de mise en place des animaux

Les animaux étaient pourvus d'une ceinture en toile bourrée de kapok, fixée à la partie inférieure de l'encolure. Grâce à cette ceinture, la tête était maintenue hors de l'eau. Les animaux étaient répartis le long d'un câble métallique pourvu d'anneaux et fixé à des bateaux, chaque animal étant attaché au moyen d'un double mousqueton, passé dans un collier, l'autre dans l'anneau du câble.

Les distances auxquelles les animaux devaient être attachés étaient calculées d'avance en fonction de la charge d'explosif et de sa profondeur.

(1) Ces expériences ont été magistralement dirigées par le Colonel Tessier de la section technique du Génie.

2° Anatomico-pathologie

C'est intentionnellement que nous avons placé l'étude des lésions avant celle des signes cliniques, l'anatomie pathologique nous paraissant susceptible d'éclairer la physio-pathologie et de guider la thérapeutique à opposer aux accidents résultant des explosions sous l'eau.

Par ordre d'importance, nous envisagerons :

- Les lésions pulmonaires;
- Les lésions gastro-intestinales;
- Les lésions secondaires;
- Les lésions nerveuses.

Quel est l'ordre de fréquence de ces lésions?

Par rapport au nombre des animaux tués et blessés :

Les lésions pulmonaires s'inscrivent avec un pourcentage moyen de 71 p. 100.

Les lésions gastro-intestinales s'inscrivent avec un pourcentage moyen de 65,3 p. 100.

Les autres lésions ne sont que secondaires.

Lésions pulmonaires

Ainsi que nous venons de le voir, les lésions pulmonaires l'emportent en fréquence sur les autres lésions.

Macroscopiquement ces lésions consistent essentiellement en des *hémorragies du parenchyme pulmonaire* dont on peut observer toute une gamme :

— foyers hémorragiques de dimensions variables disséminés dans les lobes;

— hémorragies *massives* affectant un lobe tout entier et même la totalité des deux poumons avec quelquefois en surface de véritables hématomes dont l'enveloppe est formée par la plèvre viscérale;

— enfin des *déchirures du parenchyme* aboutissant à la formation d'un *hémothorax*.

Ces lésions se répartissent ainsi :

Hémorragies lobaires massives avec hémothorax par déchirures du parenchyme	13
Hémorragies lobaires massives sans hémothorax	15
Foyers hémorragiques de dimensions variables disséminés dans les lobes	13
Total	41

Au sortir de la cavité thoracique, la masse formée par les poumons gorgés de sang est impressionnante et fréquemment on peut voir l'*empreinte* des côtes dans le parenchyme.

A signaler également les *suffusions sanguines* localisées le long des côtes sous la plèvre pariétale; ces suffusions sont unilatérales ou bilatérales suivant la position qu'occupait l'animal au moment de l'explosion, elles témoignent de la violence de l'impact direct de l'onde de choc sur les parois costales.

Evolution des lésions pulmonaires. — Les lésions que nous venons de décrire sont mortelles dans la plupart des cas, mais chez les sujets blessés qui survivent, elles sont susceptibles d'évoluer, ainsi que nous avons pu nous en assurer en sacrifiant des animaux à différentes périodes après les explosions.

Cette évolution se fait soit dans le sens d'une *infection secondaire*, soit vers une organisation des parties lésées. Dans le premier cas, les foyers hémorragiques des lobes atteints deviennent nettement purulents. Si la lésion évolue vers l'organisation, le tissu pulmonaire acquiert une certaine fermeté.

Histo-pathologie. — Les caractères histo-pathologiques varient suivant le lieu du prélèvement et l'âge de la lésion.

Pour les lésions d'emblée mortelles, les coupes pratiquées en plein foyer défont parfois toute description, la structure histologique du tissu pulmonaire étant totalement bouleversée : on n'aperçoit plus alors que des hématies tassées les unes contre les autres, et des amas d'hémosidérine.

Sur des foyers moins importants et à la périphérie, l'image histologique est celle d'une *alvéolite hémorragique*, mais d'une alvéolite hémorragique dépourvue de *tout attribut inflammatoire* : les parois alvéolaires sont restées minces, les hématies sont tassées les unes contre les autres et combent entièrement la cavité alvéolaire ne laissant place à aucun autre élément cellulaire (cellules alvéolaires desquamées, leucocytes, etc.).

En bref, cet aspect dénote nettement l'*origine mécanique* de la lésion.

Sur des animaux blessés et sacrifiés de 5 à 8 jours après l'expérience, les caractères histologiques peuvent revêtir deux aspects :

a) Un aspect d'*alvéolite purulente* résultant de l'infection secondaire des lésions hémorragiques primitives;

b) Un effort réactionnel marqué du tissu pulmonaire par organisation des amas globulaires qui remplissent les alvéoles.

Lésions gastro-intestinales

Les lésions gastro-intestinales consistent surtout en des *perforations de l'intestin et de l'estomac*.

Les perforations intestinales l'emportent de beaucoup en fréquence sur les perforations de l'estomac; on peut dire qu'elles ne font, pour ainsi dire, *jamais défaut* sur les sujets tués après l'explosion.

Elles peuvent siéger sur toute la longueur de l'intestin; mais elles affectent une dilection particulière pour les *régions du rectum et du colon descendant* où elles atteignent leur maximum de gravité. Il n'est pas rare, en effet, d'observer des déchirures rectales de 3 à 4 cm. de longueur. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ces portions de l'intestin, les perforations diminuent d'importance. Les bords de ces perforations sont révolvés, hémorragiques et donnent l'impression d'un véritable éclatement.

Outre ces perforations complètes, il convient de signaler de curieuses lésions qui ne semblent pas avoir été décrites, elles représentent en quelque sorte le stade précédant la perforation complète, d'où le nom de « *pré-perforation* » que nous proposons de leur donner. Elles sont aussi nombreuses que les perforations complètes et réparties sur toute la longueur de l'intestin. Macroscopiquement, elles apparaissent sous forme de petites *aires hémorragiques* faisant saillie sous la séreuse à la surface externe de l'intestin. Leurs dimensions varient de celles d'un grain de mil à une grosse bille.

Histologiquement, une microphotographie d'ensemble montre l'effondrement de la muqueuse, la sous-muqueuse de type lymphoïde pénètre en « coin » entre les deux couches rupturées de la musculuse; seule la séreuse a résisté et retient encore le flux des cellules rondes inflammatoires et le sang extravasé des capillaires déchirés. Cette disposition montre que le processus mécanique de la formation de la « *pré-perforation* » est nettement *centrifuge*.

Lésions secondaires

Alors que les lésions pulmonaires et gastro-intestinales sont constantes, les lésions que nous allons maintenant décrire ne constituent que des épisodes accidentels.

Ce sont des *déchirures du diaphragme* (un seul cas de hernie diaphragmatique) :

- des hémorragies du foie et du pancréas;
- des hémorragies sous-capsulaires rénales.

Lésions nerveuses

Pour les explosions à l'air, on admet généralement que les lésions nerveuses sont peu importantes et que les troubles nerveux observés sur les sujets accidentés par le « souffle » doivent être rattachés à des psychoses plutôt qu'à des affections neurologiques proprement dites.

A l'examen systématique des centres encéphaliques des animaux situés les plus près de la charge, nous n'avons trouvé aucune lésion macroscopique ou histologique des centres nerveux (1).

3° Symptomatologie

Chez les animaux survivants atteints par l'explosion, les signes cliniques observés fournissent des renseignements précieux sur l'évolution et le pronostic des blessures. Tous nos animaux ont d'ailleurs été tenus en observation et suivis durant un mois après les expériences.

Aussitôt après l'explosion, les sujets les plus atteints présentent des signes plus ou moins manifestes de « choc » : abatement, pupilles dilatées, faiblesse du pouls, quelques animaux laissent échapper de faibles plaintes.

La présence de sang spumeux s'écoulant par la bouche et par les narines, de même que l'extrême pâleur des muqueuses et tout spécialement de la muqueuse buccale constituent les signes les plus frappants et non équivoques de l'existence d'une grave hémorragie interne.

Du côté de l'appareil digestif, on note souvent un violent ténésme avec ou sans émission de selles hémorragiques, ce dernier symptôme assombrissant considérablement le pronostic.

Mais c'est l'examen de l'appareil respiratoire qui fournit les renseignements les plus constants. Les mouvements respiratoires peuvent être précipités (polypnée). Une respiration « discordante » est l'indice d'un épanchement pleural hématique et comme telle d'un pronostic très réservé. La percussion apporte une aide précieuse pour l'appréciation des lésions pulmonaires. Très souvent on observe une réaction tussigène à la percussion. L'existence et la position des foyers hémorragiques sont décelées par les zones de submatité ou de matité totale. Enfin, l'auscultation permet l'audition de râles ou de bruits de frottements pleuraux.

Pronostic. — L'extrême pâleur des muqueuses, les selles san-

(1) Dans un cas seulement : petite hémorragie sous la dure-mère au niveau d'un hémisphère cérébral.

glantes, la respiration discordante et la présence de zones de matité étendues constituent des signes pronostiques très défavorables.

4° Essai de pathogénie

Il n'est guère douteux que, comme pour les explosions à l'air, c'est l'impact direct « le coup de bélier » de l'onde de choc sur les parois costales qui joue le rôle principal dans la *pathogénie des lésions pulmonaires* provoquées par les explosions sous l'eau, avec une violence encore accrue, puisque l'eau est un fluide presque incompressible et d'une densité plus grande que l'air.

Des constatations anatomo-pathologiques telles que la présence de suffusions sanguines sous-pleurales dans le voisinage des côtes, l'atélectasie marquée des alvéoles pulmonaires situées immédiatement sous la plèvre, en constituent des preuves.

Quant aux perforations intestinales et pré-perforations, elles paraissent bien dûes à l'action de la pression de l'onde de choc s'exerçant, par le truchement de la paroi abdominale sur une cavité contenant de l'air auquel elle communique une énergie *cinétique* capable de déterminer un effet de rupture ou *d'éclatement*.

A ce point de vue, GREAVES et ses collaborateurs ont montré le bien-fondé de cette hypothèse au moyen d'une élégante expérience; on prépare 4 courts segments d'intestin de lapin, ligaturés aux deux extrémités; le premier segment est vidé d'air et est complètement collabé, le deuxième est rempli d'air, le troisième, de sérum physiologique, le quatrième d'un mélange d'air et de sérum physiologique. Ces quatre segments sont ensuite placés dans l'eau et soumis aux effets d'une petite explosion. On constate alors que le segment collabé ainsi que celui contenant la solution de sérum physiologique sont intacts alors que les deux autres contenant de l'air, sont *rupturés*.

On pourrait maintenant se demander pourquoi la partie *rectale* de l'intestin est le plus fréquemment le siège des perforations les plus graves et il vient tout naturellement à l'esprit d'incriminer la poussée brutale de l'eau vainquant la résistance du sphincter anal et pénétrant de force dans le rectum.

Pour élucider ce point, nous avons procédé à l'expérience suivante : sur plusieurs animaux placés très près de l'explosion, on a suturé solidement l'anus après avoir bourré la poche rectale d'une compresse de gaze. Or, malgré ce dispositif, nous avons constaté que les *déchirures rectales étaient aussi graves* que sur les autres animaux. On peut donc en déduire que ce n'est pas l'irruption

brusque de l'eau dans le rectum qui provoque les graves déchirures observées en cette région.

Nous ne serions pas complets si nous omettions d'indiquer que les savants calculs établis par le Colonel TEISSIER — calculs qui ne sauraient trouver place ici — ont déterminé, pour les différentes charges utilisées, les *pressions* et les *impulsions* subies par les animaux immergés. Le Colonel TEISSIER a ainsi démontré que :

1° *La pression mortelle* a toujours été supérieure dans l'eau à 100 kgr./cm₂ (très supérieure par conséquent à celle indiquée par les auteurs Anglo-Saxons pour les explosions dans l'air: 9,5 kgr./cm₂).

2° *L'impulsion mortelle* a toujours été supérieure à 7 atmosphères millisecondes et toujours inférieure à 25 atmosphères millisecondes, c'est-à-dire de l'ordre de celle que l'on a observé dans l'air.

3° A l'aide d'enregistrements oscillographiques, des ondes de longue durée (plus de 30 millisecondes) ont été décelées à des distances de la charge explosive de l'ordre de 25 fois la profondeur de l'eau. De telles ondes ne correspondent plus à une impulsion mortelle fixe, mais à une pression mortelle fixe et il est probable que si des animaux d'expériences s'étaient trouvés dans cette zone ils auraient été tués, alors qu'une large zone de survie se serait étendue entre eux et la limite mortelle qui avait été observée. Point n'est besoin de souligner toute l'importance d'une semblable constatation, dont il convient cependant d'attendre confirmation.

5° Les enseignements thérapeutiques

Ces résultats expérimentaux peuvent-ils guider la *thérapeutique* à opposer aux accidents provoqués chez l'homme par les explosions sous l'eau? C'est ce que nous allons essayer d'examiner avec toute la prudence qui convient lorsqu'il s'agit de transposer à l'homme les observations faites sur l'animal.

Protection. — Les essais de protection que nous avons effectués ont été peu démonstratifs, mais les appareils protecteurs utilisés étaient loin d'être parfaits! On devra songer à l'étude d'une sorte de ceinture abdominale pneumatique se moulant sur la paroi abdominale et protégeant ainsi l'individu contre les risques de ces graves perforations intestinales.

Lésions du poumon. — Le caractère hémorragique des graves lésions du poumon imposent pour les blessés par les explosions

sous l'eau les mêmes précautions que pour les blessés par « souffle » aérien :

- a) Repos absolu au lit;
- b) Contre-indication formelle des injections de sérum ou de plasma qui en augmentant la masse sanguine et la pression vasculaire, accroissent du même coup l'hémorragie;
- c) Emploi de coagulants.

Indépendamment de l'examen clinique, la *Radiologie* fournira les indications les plus précieuses et devra être systématiquement pratiquée sur tous les sujets qui occupaient la zone d'action morbide.

Parmi les *complications* possibles, nos expériences ont montré que les foyers hémorragiques pouvaient *s'infecter secondairement*. Ce point ne devra jamais être perdu de vue et justifiera, à notre avis, la *pénicillothérapie préventive* sur les blessés porteurs de lésions même minimales.

Enfin, il y aura lieu d'envisager une évolution vers le type *fibreuse des lésions pulmonaires* et tenir compte de l'existence de ces lésions chroniques pour l'avenir du blessé (droit à l'invalidité, etc.).

Lésions intestinales. — Les graves lésions intestinales sont surtout du ressort du chirurgien. Seul, le chirurgien sera juge s'il doit intervenir ou non. Toutefois, nous croyons utile d'attirer l'attention sur l'existence de ces curieuses lésions que nous avons appelées « pré-perforations ». Certains blessés pourront être uniquement atteints de ces lésions (sans perforations véritables); elles se traduiront vraisemblablement par des douleurs de caractère assez fruste mettant à rude épreuve la perplexité du chirurgien. L'histologie montre qu'un flux réactionnel de cellules rondes inflammatoires tend à limiter le dégât, cependant la fragilité de cette barrière laissera toujours une possibilité de l'aboutissement à une perforation complète.

Nous posons simplement ces questions sans avoir la prétention de les résoudre, car elles dépassent notre compétence et doivent être résolues par le chirurgien.

Le bilan de ces expériences se traduit donc par un certain nombre d'acquisitions intéressantes; néanmoins un certain nombre de points restent encore à élucider, ce sera le but d'autres expériences.
