

---

PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

---

5

**EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES  
ETUDE DES RAYONS DE CAVITE**

*par*

*Lucien MICHAUD*

Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel :

**Rapport CEA - R - 3594**

**1968**

Aa

**SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A**

C.E.N. - SACLAY B.P. n°2, 91 - GIF-sur-YVETTE - France

CEA-R-3594 - MICHAUD Lucien

EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES. ETUDE DES  
RAYONS DE CAVITE

Sommaire. - Une explosion souterraine provoque la création d'une cavité due à l'expansion du milieu environnant vaporisé par le tir.

Le rayon de cette cavité est lié à l'énergie dégagée par l'explosion et à la pression des terrains de couverture.

L'introduction de nouveaux éléments caractérisant le mode de tir (tir en puits ou en galerie) et la cohésion du milieu, conduit à une relation pour déterminer ce rayon.

Les explosions souterraines connues, françaises et américaines effectuées dans des conditions très variées de milieu, énergie du tir et couverture, satisfont à cette relation avec une bonne approximation.

1968 - Commissariat à l'Energie Atomique - France 11 p.

---

CEA-R-3594 - MICHAUD Lucien

UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS. STUDY OF THE  
CAVITY RADIUS

Summary. - An underground nuclear explosion creates a cavity due to the expansion of the surrounding medium vaporized by the shot.

The cavity radius is related to the energy of explosion and to the overburden pressure of the medium.

The introduction of new elements such as the environment of the device (in a deep hole or in a tunnel) and the cohesion of the medium leads to a relationship which determines this radius.

The known French and American underground explosions performed in various media, energy and overburden conditions, satisfy this relationship with a good precision.

1968 - Commissariat à l'Energie Atomique - France 11 p.

---

Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel

Département des Mesures

EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES  
ETUDE DES RAYONS DE CAVITE

par

Lucien MICHAUD

- Novembre 1968 -

EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES  
ETUDE DES RAYONS DE CAVITE

Une explosion nucléaire souterraine provoque en quelques dizaines de millisecondes la formation d'une cavité due à l'expansion des gaz créés par les très fortes températures auxquelles sont soumis les matériaux entourant l'engin.

Cette cavité n'est pas, en général, stable. Au bout d'un temps variant de quelques minutes à quelques heures, le toit de cette cavité s'effondre, entraînant par foudroyages successifs, la formation d'une "cheminée" d'éboulis dont le foisonnement déterminera le développement.

Le rayon de la cavité créée par le tir conditionne ainsi directement le volume de la cheminée et se trouve être par conséquent l'un des paramètres essentiels de toute étude du comportement d'un milieu donné sous l'effet d'une explosion nucléaire.

POSITION DU PROBLEME

Le rayon de cavité  $R_c$  est une fonction de l'énergie  $W$  du tir. Mais il est lié également aux caractéristiques physiques, à la composition du milieu, et à l'épaisseur des terrains de recouvrement au-dessus du point zéro.

Ces différentes grandeurs s'introduisent en écrivant que l'expansion des gaz dans la cavité est adiabatique et que, à l'équilibre, la pression intérieure des gaz,  $P_c$  est égale à la résultante des pressions externes qui s'exercent sur cette cavité, de volume final  $V_c$ .

Soit  $P_g$  la pression moyenne des gaz (roches vaporisées par l'explosion) au moment où le choc a atteint la limite de la zone vaporisée, de volume  $V_v$ .

L'expansion adiabatique de ces gaz s'écrit :

$$(1) \quad P_g V_v^\gamma = P_c V_c^\gamma$$

Soit, en introduisant les rayons au lieu des volumes pour les différentes zones :

$$(2) \quad R_c = \left[ \frac{R_g^\gamma R_v^3}{P_c^\gamma} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_v = \text{rayon de vaporisation} \\ R_c = \text{rayon de la cavité finale} \end{array} \right.$$

## INFLUENCE DU VOLUME DE LA CHAMBRE DE TIR

Un grand nombre de tirs nucléaires se fait selon la technique dite des "tirs en puits".

Dans ce mode de tir, le couplage de l'explosif nucléaire au milieu environnant est assuré pratiquement sans solution de continuité.

Certaines expérimentations ont été effectuées selon la technique des "tirs en galerie" avec une chambre terminale accessible, de volume  $V_0$  bien défini et non négligeable.

Dans ce dernier cas, le couplage se fait par l'intermédiaire de ce volume d'air  $V_0$  ce qui a pour effet de modifier certains paramètres dont, essentiellement, le volume de roche vaporisée.

Celui-ci devient  $V'_v$ , et correspond à un rayon vaporisé  $R'_v$ .

Si nous négligeons masse de l'engin et de l'air devant la masse de roche vaporisée, la relation (1) devient :

$$(3) \quad P_g V'_v{}^\gamma = P_c V_c{}^\gamma \quad \text{or} \quad V'_v = \frac{4\pi}{3} (R'_v{}^3 - R_o{}^3)$$

La relation (3) s'écrit donc :

$$R_c = \left[ \frac{P_g \frac{1}{\gamma} (R'_v{}^3 - R_o{}^3)}{P_c \frac{1}{\gamma}} \right]^{1/3}$$

ou encore

$$(4) \quad R_c = \left[ \frac{P_g \frac{1}{\gamma} \alpha R_v{}^3}{P_c \frac{1}{\gamma}} \right]^{1/3}$$

avec :

$$(5) \quad \alpha = \frac{R'_v{}^3 - R_o{}^3}{R_v{}^3}, \quad R_v \text{ étant le rayon de la zone vaporisée correspondant à un tir identique mais effectué en puits.}$$

Le coefficient  $\alpha$  se présente donc comme un facteur correctif qui permet de tenir compte du volume de la chambre de tir. Il est égal à 1 dans le cas des tirs en puits. Sa valeur peut être calculée numériquement dans tous les cas par des méthodes classiques de résolution des équations du choc dans la zone proche (réf. 1).

## INFLUENCE STRUCTURALE DU MILIEU

L'expansion de la cavité s'arrête lorsque l'équilibre des forces internes et externes est réalisé sur ses parois. Nous avons vu que la pression intérieure était celle de l'expansion adiabatique des gaz formé par l'explosion. La pression extérieure, s'exerçant sur la cavité, ne

dépend, elle, que des terrains de couverture.

- Ceux-ci agissent d'abord par leur poids propre

$$(6) \quad P_1 = \rho g h \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho = \text{densité moyenne des terrains} \\ h = \text{hauteur des terrains de couverture} \\ g = \text{accélération de la pesanteur} \end{array} \right.$$

Mais, se borner à ne faire intervenir que le poids des terrains reviendrait à dire que les conditions d'équilibre de la cavité créée par une explosion nucléaire, ne seraient déterminées que par un seul paramètre, la densité du milieu.

Nous pensons qu'il y a lieu d'introduire, en plus de la densité, une grandeur qui caractérise la structure même du milieu considéré.

Nous savons que l'extension vers le haut, de la cheminée formée, est analogue à celle de la zone fracturée par le tir.

Au-dessus de la cheminée, la roche, qui n'a subi qu'un comportement élastique, possède des caractéristiques mécaniques analogues à celles qu'elle avait avant l'explosion.

La cohésion de cette voûte au-dessus de la zone fracturée agit, par l'intermédiaire de la résistance à la traction de la roche, pour s'opposer à l'expansion de la cavité.

Dans le cas d'un milieu idéalement homogène, le calcul montre que cette contrainte a pour composante verticale :

$$(7) \quad P_2 = 2 T \quad \left\{ \begin{array}{l} T = \text{résistance à la traction des terrains de} \\ \text{couverture.} \end{array} \right.$$

Dans les milieux réels, cette contrainte est plus difficile à évaluer. Elle est très faible pour les terrains meubles comme les alluvions par exemple ; elle est beaucoup plus importante pour des roches très compactes comme certains granites.

- D'autres effets peuvent également être pris en considération tels que la morphologie du massif, les possibles stratifications, éventuellement même les précontraintes naturelles d'origine tectonique

En résumé, l'ensemble des différentes contraintes extérieures s'exerçant sur la cavité peut donc s'exprimer par une relation du type :

$$(8) \quad P_c = \rho g h + C_s$$

$C_s$  représentant l'ensemble des contraintes d'origine structurale caractérisant le milieu considéré.

## RELATION GENERALE DEFINISSANT LE RAYON DE CAVITE

En tenant compte de l'expression des contraintes (8), la relation (5) devient :

$$(9) \quad R_c = \left[ \frac{P_g \frac{1}{\gamma} \alpha R_v{}^3}{(\rho g h + C_s) \frac{1}{\gamma}} \right]^{1/3}$$

Cette dernière relation permet le calcul des rayons de cavité pour toutes les conditions de tir possibles et tous les milieux.

L'énergie  $W$  de l'explosion s'introduit par l'intermédiaire du rayon  $R_v$  de la zone vaporisée. En effet, pour tous les milieux, ce rayon est lié à l'énergie par la relation :

$$(10) \quad R_v = r_v W^{\frac{1}{3}} \quad \left| \begin{array}{l} W \text{ en KT} \\ r_v = \text{rayon de la zone vaporisée pour 1 KT} \\ \text{dans un milieu donné.} \end{array} \right.$$

Il s'ensuit que le rayon de cavité est lié à l'énergie du tir par la relation :

$$(11) \quad R_c = P_g^{\frac{1}{3\gamma}} \alpha^{\frac{1}{3}} r_v \frac{W^{\frac{1}{3}}}{(\rho gh + C_s)^{\frac{1}{3\gamma}}}$$

Le terme  $(P_g^{\frac{1}{3\gamma}} \alpha^{\frac{1}{3}} r_v)$  caractérise le comportement du milieu vis-à-vis de l'onde de choc nucléaire,

Le terme  $W^{\frac{1}{3}}$ , l'énergie du tir.

Le terme  $\rho gh + C_s$  la profondeur du tir et la cohésion du milieu.

NOTA - Si nous négligeons ce dernier effet ainsi que l'influence de la présence d'une chambre de tir éventuelle, l'expression (11) se réduit à la forme bien connue : (voir par exemple Réf. 4 appendice 1).

$$(12) \quad R_c = K \frac{W^{\frac{1}{3}}}{(\rho gh)^{\frac{1}{3\gamma}}} \text{ dont elle est par conséquent une généralisation}$$

Elle précise en outre la valeur de  $K$  et montre que cette "constante" dépend en fait

du milieu ( $K = r_v P_g^{\frac{1}{3\gamma}}$ ).

#### RECHERCHE D'UNE RELATION NUMERIQUE APPROCHÉE

Nous venons de voir que le rayon de la cavité produite par une explosion nucléaire souterraine pouvait être calculé à partir d'un certain nombre de données relatives aux conditions de tir et à la nature du milieu.

Or l'ensemble des données théoriques ou expérimentales que nous connaissons sur les tirs étrangers, est insuffisant pour déterminer avec une précision correcte les paramètres introduits dans la formule (11). En effet, certaines caractéristiques physiques entrant dans le code de calcul ainsi que les contraintes structurales du milieu, ne sont pas publiées.

Il est cependant parfois nécessaire de disposer d'une relation numérique permettant une estimation de cette grandeur avec une approximation convenable.

Il se trouve, et l'expérience le confirme, que la valeur de  $K = r_v P_g^{\frac{1}{3\gamma}}$  dépend très peu des caractéristiques du milieu.

Nous rechercherons donc pour établir notre relation approchée un coefficient  $K$  constant et indépendant du milieu.

Par contre, la contrainte de structure  $C_s$ , par sa nature même, doit dépendre très largement des caractéristiques des terrains situés au-dessus du point zéro.

Nous disposons pour déterminer ces valeurs, d'un certain nombre de résultats expérimentaux de tirs français et américains, d'énergie très variée, dans des milieux également très diversifiés.

Outre les résultats des expérimentations françaises en milieu granitique, nous avons pris en considération ceux publiés dans le rapport (réf. 2) relatifs à :

- 30 tirs de 0,019 à 21,5 KT dans les Alluvions ( $\gamma = 1,125$ )
- 11 tirs de 1,8 à 22 KT dans le Tuff ( $\gamma = 1,14$ )
- 2 tirs de 5,4 et 13,4 KT dans le Granite ( $\gamma = 1,03$ )
- 2 tirs de 3,1 et 5,3 KT dans le Sel ( $\gamma = 1,09$ )
- 1 tir de 12 KT dans la Dolomie ( $\gamma = 1,03$ )

Faute de pouvoir calculer le coefficient  $\alpha$  pour chaque tir, par suite du manque de données publiées, nous avons supposé pour tous ces tirs  $\alpha^{1/3} \neq 1$ .

Nous en avons déduit des valeurs de  $K$  et de  $C_s$  et nous avons retenu celles qui, dans chaque milieu, conduisaient à la dispersion la plus faible.

Lorsque les pressions sont exprimées en bars, les énergies en kilotonnes et les longueurs en mètres, ces valeurs sont :

$$(13) \quad \text{Coefficient } K = 52 \text{ quel que soit le milieu.}$$

- Contrainte de structure  $C_s$

Les valeurs de  $C_s$  dans les différents milieux sont données dans le tableau suivant :

	Cs moyen	Dispersion (écart-type)	
(14) {	Tuff	5	$0 < C_s < 15$
	Alluvions	20	$5 < C_s < 40$
	Sel	30	20 et 35
	Granite (résultats US)	30	10 et 45
	Dolomie	110	un seul tir
	Granite (résultats français)	220	$120 < C_s < 320$

En prenant pour  $C_s$  les valeurs extrêmes du tableau (14), la dispersion sur les rayons de cavité calculés par la relation (11) est de  $\pm 8\%$  quel que soit le milieu.

La relation (11) peut donc s'écrire, sous une forme qui tient compte de tous les résultats expérimentaux connus :

$$(15) \quad R_c = 52 \frac{\alpha^{\frac{1}{3}} W^{\frac{1}{3}}}{(\rho gh + C_s)^{\frac{1}{3\gamma}}} \quad (\text{m, KT, bars})$$

Dans cette relation :

- $\alpha$  = coefficient correctif pour les tirs en galerie ( $\alpha = 1$  pour les tirs en puits)
- $\rho$  = densité
- $g$  = accélération de la pesanteur ( $\rho gh$  exprimé en bars)
- $h$  = hauteur de la couverture
- $W$  = énergie de l'explosion en kilotonnes
- $C_s$  = coefficient de structure donné dans le tableau (14)
- $\gamma$  = coefficient d'expansion adiabatique variant de 1,03 à 1,14 selon les milieux. En moyenne  $\gamma = 1,08$ .

Cette relation est vérifiée par toutes les explosions nucléaires connues avec une approximation inférieure à  $\pm 10\%$  (écart-type).

#### REMARQUE 1

Nous avons mis en évidence l'influence d'un paramètre nouveau, la contrainte de structure. La valeur de cette contrainte, très faible dans le cas des terrains meubles, devient importante dans les terrains homogènes et compacts. Si bien que, pour les tirs effectués dans ces derniers milieux avec une couverture inférieure à quelques centaines de mètres, le terme  $\rho gh$  qui était jusqu'alors seul pris en considération dans les publications antérieures, devient au contraire pratiquement négligeable devant la contrainte de structure.

Il s'ensuit que, dans de tels milieux, la relation (15) se simplifie et devient sensiblement :

$$(16) \quad R_c = K_1 W^{\frac{1}{3}} \quad (\text{m, KT})$$

Nous voyons ainsi qu'une loi simple en  $W^{\frac{1}{3}}$ , indépendante de la hauteur de couverture, peut, dans certains cas, être très représentative.

#### REMARQUE 2

L'écart entre les valeurs de la contrainte de structure pour les différents granites observés, peut paraître important.

Il s'explique cependant par la grande variété des formations granitiques et en particulier par l'existence de réseaux de failles préexistantes plus ou moins denses au voisinage du point zéro (voir réf. 4).

#### CONCLUSION

Grâce à l'introduction, dans la loi qui régit l'expansion de la cavité, de nouvelles grandeurs caractérisant le mode de tir et la structure du milieu, nous avons déterminé une relation très générale permettant le calcul du rayon de la cavité formée dans un milieu quelconque par une explosion nucléaire.

Nous en avons déduit une expression approchée

$$R_c = 52 \frac{\alpha^{\frac{1}{3}} W^{\frac{1}{3}}}{(\rho gh + C_s)^{\frac{1}{3\gamma}}} \quad (\text{m, KT, bars})$$

qui est représentative de tous les tirs connus effectués dans des milieux très divers et qui conduit à une dispersion inférieure à  $\pm 10\%$ .

Ce bon accord avec l'expérience nous laisse présager que cette relation permet des extrapolations assez sûres pour des énergies, des profondeurs et des milieux différents de ceux actuellement connus.

#### REMERCIEMENTS

Nous remercions tout particulièrement MM. SUPLOT et LARZILLIERE pour la programmation des différents calculs intervenant dans ce rapport. Nous avons également bénéficié des suggestions de Mme DUCLAUX pour sa rédaction.

REFERENCES

- [ 1 ] Code "C.A.D.E.S." (Calcul des Explosions Souterraines) -  
Rapport interne par MM. BRUGIES et SUPLOT
- [ 2 ] Effect of water content, yield, medium and depth of burst on cavity radii  
University of California - UCRL 50203 - P. HIGGINS et T. BUTKOVITCH  
(1967)
- [ 3 ] The gas equation of state for natural materials  
University of California - UCRL 14729 - T. BUTKOVITCH (1967)
- [ 4 ] Characteristic effects of contained nuclear explosions for evaluation of mining  
applications  
University of California - UCRL 7350 - Charles BOARDMAN, David D.  
RABB, Richard D. Mc ARTHUR (12 septembre 1963)

*Manuscrit reçu le 5 juillet 1968*

**FIN**