

5.0

PHENOMENOLOGIE GENERALE
DES EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES

par

Serge DERLICH, Francis SÜPIOT

SOUS-DIRECTION DES ESSAIS

Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel

Rapport CEA - R - 3750

1969

Da

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A

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

CEA-R-3750 - DERLICH Serge, SUPIOT Francis
PHENOMENOLOGIE GENERALE DES EXPLOSIONS
NUCLEAIRES SOUTERRAINES

Sommaire. - On donne une description essentiellement qualitative des phénomènes liés aux explosions nucléaires souterraines (explosion d'un seul engin, d'engins en ligne et explosions simultanées).

Dans un premier chapitre sont décrits les phénomènes communs aux explosions contenues et aux explosions formant un cratère (formation et propagation d'une onde de choc provoquant la vaporisation, la fusion et la fracturation du milieu).

Le deuxième chapitre décrit les phénomènes liés aux tirs contenus (formation d'une cavité et d'une cheminée).

./.

CEA-R-3750 - DERLICH Serge, SUPIOT Francis
GENERAL PHENOMENOLOGY OF UNDERGROUND
NUCLEAR EXPLOSIONS

Summary. - An essentially qualitatively description is given of the phenomena related to underground nuclear explosions (explosion of a single unit, of several units in line, and simultaneous explosions).

In the first chapter are described the phenomena which are common to contained explosions and to explosions forming craters (formation and propagation of a shock-wave causing the vaporization, the fusion and the fracturing of the medium).

The second chapter describes the phenomena related to contained explosions (formation of a cavity with a chimney).

./.

Le troisième chapitre est consacré à la phénoménologie des tirs formant un cratère et décrit notamment le mécanisme de formation et les différents types de cratères en fonction de la profondeur d'explosion et de la nature du terrain. Les phénomènes aériens liés aux explosions formant un cratère : onde de pression aérienne et focalisation à grande distance, nuages de poussières, sont également abordés.

1969

37 P.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

The third chapter is devoted to the phenomenology of test explosions which form a crater ; it describes in particular the mechanism of formation and the different types of craters as a function of the depth of the explosion and of the nature of the ground. The aerial phenomena connected with explosions which form a crater : shock wave in the air and focussing at a large distance, and dust clouds, are also dealt with.

1969

37 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

- Rapport CEA-R-3750 -

Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel
Sous-Direction des Essais

PHENOMENOLOGIE GENERALE
DES EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES

par

Serge DERLICH, Francis SUPIOT

- Août 1969 -

TABLE DES MATIERES

	Pages
RESUME	
I - INTRODUCTION	3
II - PHENOMENES COMMUNS AUX EXPLOSIONS CONTENUES ET AUX EXPLOSIONS FORMANT UN CRATERE	3
1. Zone de roches vaporisées ou "zone vaporisée"	5
2. Zone de roches fondues ou "zone fondue"	5
3. Zone de roches broyées et fracturées	6
4. Ecaillage	6
5. Zone sismique	8
III - EXPLOSIONS CONTENUES	8
1. Formation de la cavité	9
2. Formation de la cheminée	12
IV - EXPLOSIONS FORMANT UN CRATERE	14
1. Effets de l'onde de choc	15
2. Effets de l'expansion des gaz	16
3. Importance relative de l'onde de choc et de l'expansion des gaz en fonction de la profondeur d'explosion	19
4. Définition des dimensions et zones d'un cratère formé par éjection de matière	20
5. Stabilité des pentes	22
6. Dimensions expérimentales des cratères apparents	23
7. Cratères en ligne formant des tranchées	23
8. Phénomènes secondaires se manifestant lors d'une explosion formant un cratère	24
a) Onde de pression aérienne	24
b) Nuage	27
V - CONCLUSION	28
REFERENCES	29

PHENOMENOLOGIE GENERALE DES EXPLOSIONS
NUCLEAIRES SOUTERRAINES

I - INTRODUCTION

L'emploi de l'explosif nucléaire pour des travaux de génie civil, miniers ou pétroliers ouvre la voie à des possibilités de réalisations très importantes.

En effet, un explosif nucléaire permet de concentrer sous un très faible volume une grande quantité d'énergie ($4,18 \cdot 10^{19}$ ergs par kt, soit l'équivalent de 1 000 tonnes de TNT dans un volume inférieur à 1 m^3) qui peut être libérée quasi instantanément et provoque des transformations du milieu impossibles à obtenir avec des moyens classiques.

La connaissance qualitative et quantitative de ces transformations est indispensable pour envisager des applications industrielles des explosions nucléaires.

Suivant la profondeur de tir dans le sol, l'explosion peut conduire à la formation d'un cratère ou être contenue (pas de déformations permanentes importantes à la surface du sol).

L'objet de ce rapport est d'examiner, d'une manière essentiellement descriptive, la phénoménologie de ces deux types d'explosion, et leurs effets sur le milieu environnant.

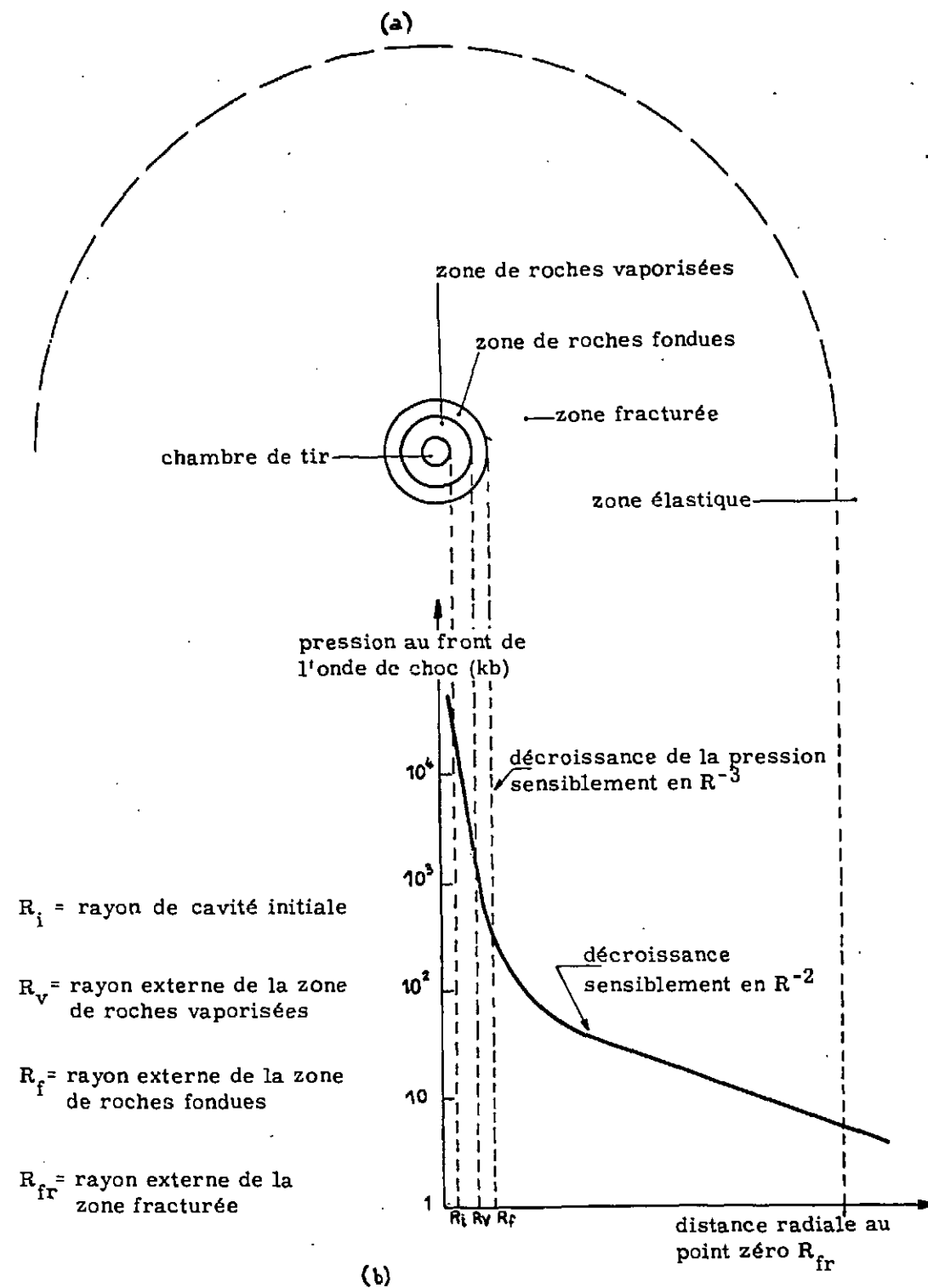
II - PHENOMENES COMMUNS AUX EXPLOSIONS CONTENUES ET AUX EXPLOSIONS FORMANT UN CRATERE

Les phénomènes communs décrits dans ce chapitre correspondent aux premiers instants qui suivent une explosion nucléaire (quelques millisecondes) car la profondeur de l'explosion n'a pratiquement pas d'influence sur le déroulement de ces phénomènes.

L'engin est généralement placé dans une chambre de tir creusée au sein du milieu. Dans les premières microsecondes après le déclenchement de l'explosion apparaît une "boule de feu" à très haute température qui se développe rapidement dans l'air de la chambre suivant un processus radiatif. Lorsque la boule de feu atteint les parois de la chambre, une onde de choc puissante prend naissance et se propage dans le milieu [réf. 1].

Cette onde de choc produit des transformations importantes du milieu dans lequel elle se propage en créant sur son passage différentes zones suivant la nature des transformations subies (fig. 1).

Autour de la chambre de tir, il se forme successivement une zone de roches vaporisées, puis une zone de roches fondues, une zone fracturée et une zone élastique. La figure n° 1 (a) montre l'importance de ces différentes zones qui sont sphériques si le milieu est homogène. La figure n° 1 (b) donne un ordre de grandeur des pressions de l'onde de choc au cours de sa propagation.



- Figure 1 -

Transformations subies par la roche au passage de l'onde de choc

1. Zone de roches vaporisées ou "zone vaporisée"

a) Pression de vaporisation d'un matériau

L'onde de choc abandonne une partie de son énergie sous forme de chaleur dans le matériau où elle se propage [réf. 2]. Plus la pression de l'onde de choc est élevée, plus la quantité de chaleur abandonnée dans le milieu est importante. Au-delà d'une certaine pression la chaleur déposée est telle qu'il y a vaporisation du matériau. La "pression de vaporisation" est caractéristique du milieu.

Le tableau ci-dessous donne les pressions de vaporisation pour quelques milieux :

Alluvions	: 0,7 mégabar
Granite	: 1,8 "
Tuf	: 0,9 à 1,1 mégabar (suivant la teneur en eau)
Sel	: 0,8 mégabar.

Les valeurs données ci-dessus ne sont que des moyennes, la pression de vaporisation dépendant de la teneur en eau, de la densité, de la composition chimique, qui peuvent varier notablement pour un même milieu.

b) Zone vaporisée lors d'un tir nucléaire

La pression de l'onde de choc qui prend naissance sur les parois de la chambre de tir est de l'ordre de quelques mégabars à plusieurs centaines de mégabars suivant les dimensions de la chambre de tir et l'énergie libérée par l'explosion [réf. 2].

La pression décroît en fonction de la distance du front de choc au point de l'explosion. Dans toute la zone où la pression reste supérieure à la pression de vaporisation, le milieu est vaporisé au passage de l'onde de choc.

Pour un milieu donné le volume des roches vaporisées est proportionnel à l'énergie de l'explosion.

Suivant le milieu (alluvions, granite, tuf, sel), il y a vaporisation en moins de 100 microsecondes de 25 à 50 m³ de roches pour une explosion de une kilotonne. Le rayon de la zone vaporisée est donné par une formule de la forme $R_v = k_v W^{1/3}$, R_v en m et W en kt, (k_v variant entre 1,8 et 2,3 suivant le milieu).

La température des gaz de roches vaporisées peut atteindre plusieurs milliers de degrés.

2. Zone de roches fondues ou "zone fondue"

On définit une "pression de fusion" caractéristique du matériau. Cette pression, inférieure à la pression de vaporisation, est de l'ordre de quelques centaines de kilobars pour des milieux solides. Comme la pression de vaporisation, elle dépend de la teneur en eau, de la densité et de la composition chimique du matériau.

Dans toute la zone où la pression de l'onde de choc est comprise entre la pression de vaporisation et la pression de fusion du milieu, le matériau est fondu.

Pour un tir de une kilotonne dans du granite, il y a fusion en moins de 300 microsecondes d'environ 100 m³ de roches au passage de l'onde de choc. Le rayon de la

zone fondue et l'énergie de l'explosion sont reliés par une relation de la forme $R_f = k_f W^{1/3}$, k_f étant de l'ordre de 3 pour une roche dure du type granitique, R_f en m et W en kt.

Cependant, comme dans le cas du volume vaporisé, le volume des roches fondues dépend pour les petites explosions du rayon de chambre initiale. Par exemple, pour un tir de une kilotonne, dans une chambre de 5 à 6 mètres de rayon, il n'y a pratiquement pas des roches fondues.

3. Zone des roches broyées et fracturées (fig. 2)

Quand la valeur de la pression de choc tombe en-dessous de la pression de fusion, l'onde de choc agit comme une onde de compression. Suivant son amplitude et les caractéristiques mécaniques de la roche traversée, on observe des transformations diverses. Ainsi, une roche aussi dure que le granite devient friable et prend un aspect crayeux. Les constituants minéralogiques sont intimement fracturés et présentent même des déformations plastiques. L'aspect de la roche est analogue à celui que l'on rencontre à proximité immédiate du point d'explosion d'une cartouche de dynamite : la roche est "brûlée". En s'éloignant du point d'explosion, les grains pulvérisés passent à un sable fin puis grossier. Cette zone de roches broyées ou "zone broyée" s'étend approximativement sur des distances R telles que : $7,3 W^{1/3} < R < 10 W^{1/3}$ (R : distance en mètres ; W énergie en kt). Ces distances limites, comme celles qui sont données plus loin correspondent aux résultats observés dans le granite du terrain d'essai saharien [réf. 3]. Les échantillons recueillis ensuite sont de la taille de cailloux puis de blocs*. Enfin, il est possible d'extraire des forages, des carottes cylindriques affectées de nombreuses cassures. L'orientation de ces fractures est facile à mesurer avec précision par rapport à l'axe du forage. Elle semble plutôt liée aux réseaux de fractures existant dans la roche avant le tir qu'aux directions radiales ou tangentielles par rapport au tir. Cette zone de roches fracturées ou "zone fracturée" est comprise entre $10 W^{1/3}$ et $26 W^{1/3}$ (cas du granite réf. 3).

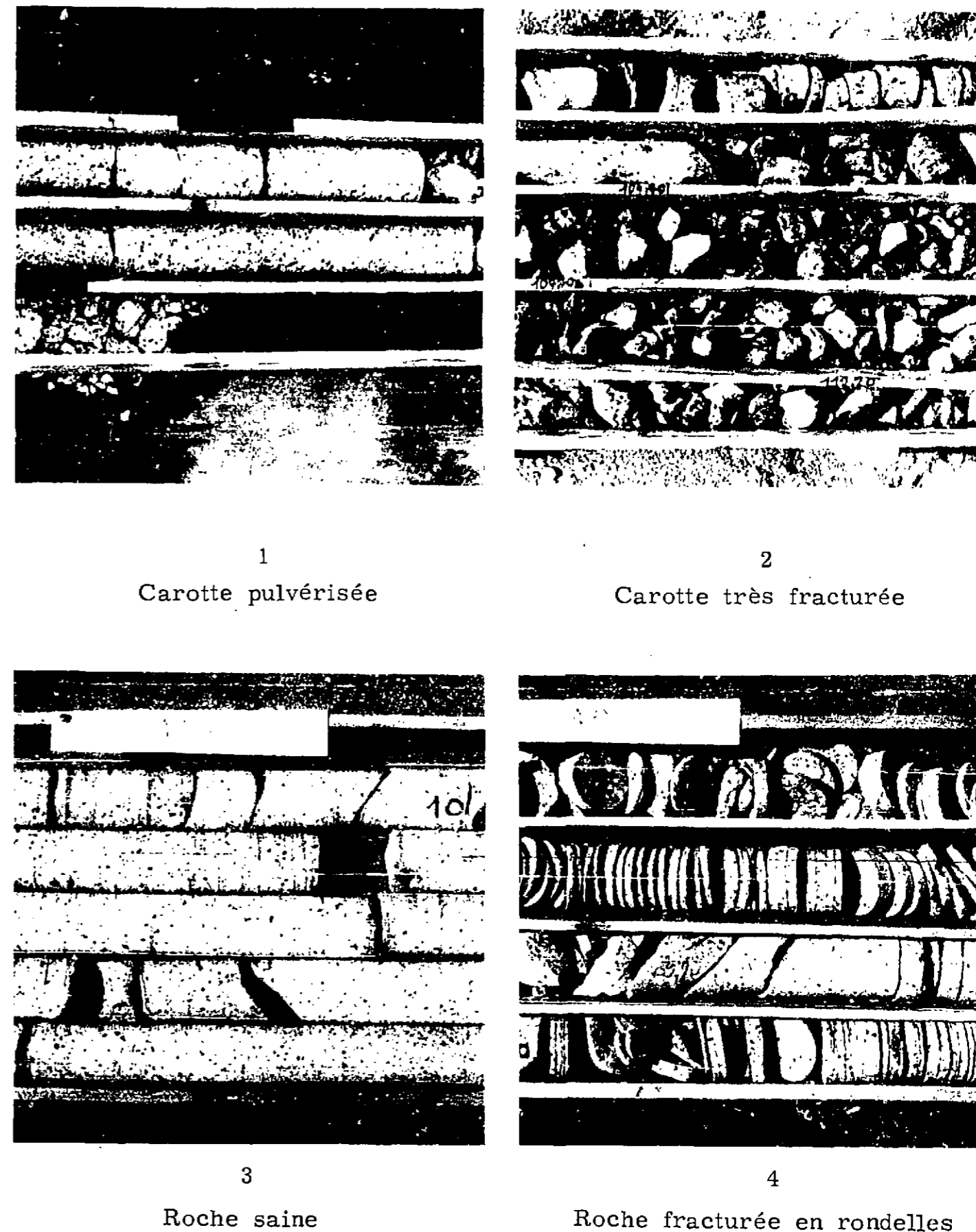
A la limite zone fracturée, zone élastique sur une distance R telle que : $26 W^{1/3} < R < 35 W^{1/3}$ (cas du granite) les conditions de contraintes du milieu imposent un état permanent de déformations forcées. Lorsque les travaux miniers ou les sondages atteignent cette zone, il y a modification de l'état des contraintes et production de rondelles sur les carottes ou d'écaillage aux parois des galeries (fig. 3).

4. Ecaillage

En atteignant la surface du massif, l'onde de compression peut posséder une amplitude suffisante pour détruire les roches altérées. Suivant le profil topographique, il peut se produire des éboulements importants dont la répartition est très peu fonction de la distance au point d'explosion. Par réflexion de l'onde de choc sur une interface entre deux milieux différents, l'onde de compression se transforme en onde de détente et peut donner

* Les cailloux ont une taille comprise entre 1 cm et 10 à 20 cm.
Les blocs ont des dimensions supérieures à 10 à 20 cm.

- Figure 2 -



naissance au phénomène d'écaillage [réf. 4] en particulier à la surface du massif et dans les galeries. Mais il est souvent atténué et masqué par les formes et altérations du relief.

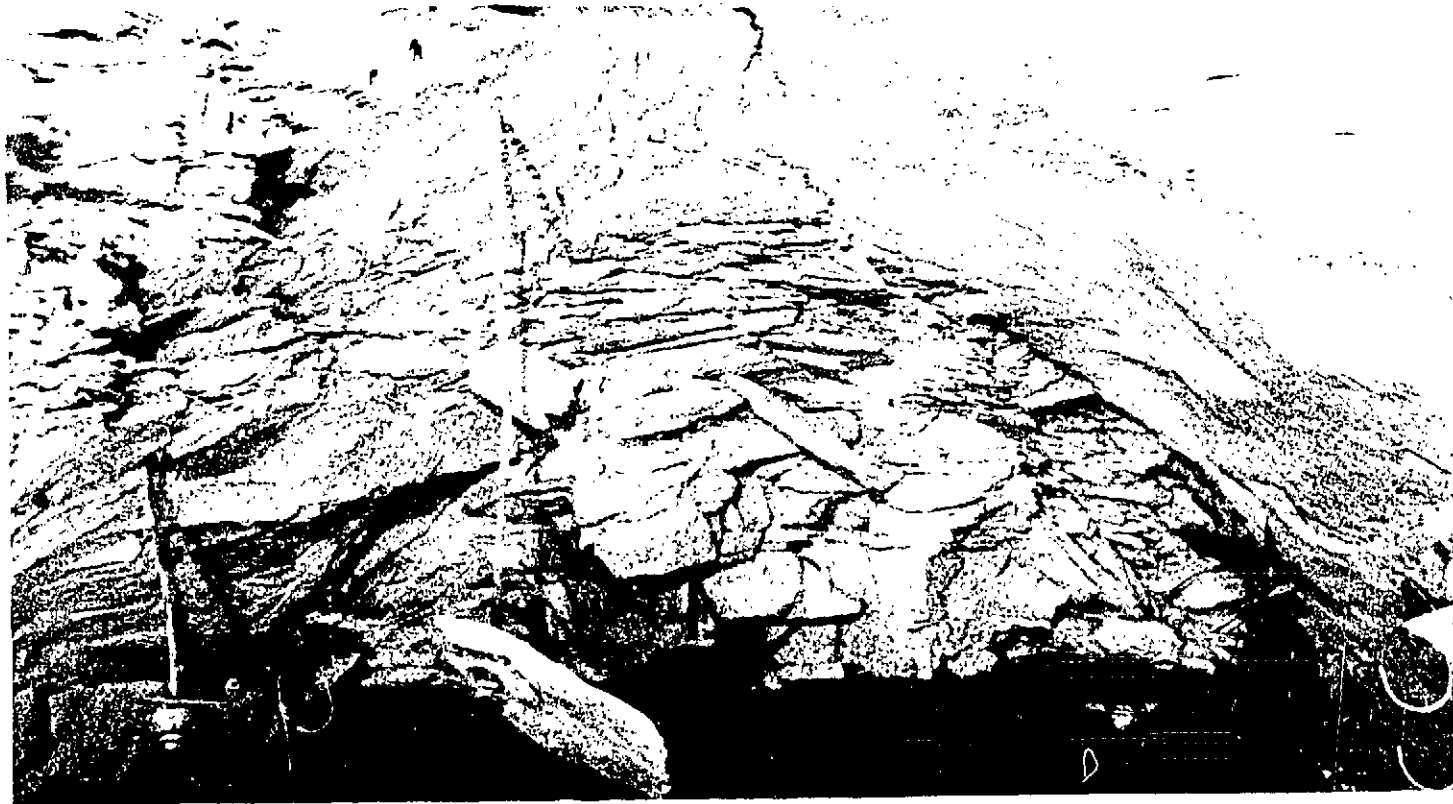


Fig. 3 : écaillage au toit d'une galerie à proximité du point d'explosion.

5. Zone sismique

Dans la zone élastique, au-delà de la distance $R = 35 W^{1/3}$ (cas du granite) il n'y a plus de rupture. L'onde de choc devient une onde sismique. Le matériau se déforme élastiquement suivant la loi de Hooke et tant que l'onde de pression se propage dans la masse il n'y a pas de manifestation de rupture. Cependant, la présence de galeries provoquant un renforcement local des contraintes contribue à la destruction des parois par écaillage. A grande distance du tir il se forme des ondes de surface (ondes de Rayleigh et de Love) qui se propagent avec une orientation préférentielle due au relief.

III - EXPLOSIONS CONTENUES

Une explosion souterraine est dite contenue lorsque l'on n'observe aucune déformation permanente importante du sol à la verticale du point de tir.

La principale caractéristique d'une explosion contenue est la formation d'une cavité et d'une cheminée.

1. Formation de la cavité

Après le passage de l'onde de choc qui a vaporisé, fondu et fracturé le milieu autour du point d'explosion, les gaz constitués essentiellement par les roches vaporisées et portées à très haute température, se trouvent enfermés dans une sphère de quelques mètres de rayon. Leur pression peut être évaluée à plusieurs centaines de kilobars. Ces gaz se détendent de façon sensiblement adiabatique en repoussant les parois de la cavité jusqu'à ce que leur pression soit en équilibre avec la pression des terrains au niveau du point d'explosion.

L'équilibre des pressions est atteint en quelques dizaines de millisecondes.

Pour une explosion d'une kilotonne à une profondeur de 100 mètres, le volume de la cavité produite varie entre 2 000 et 8 000 m³ suivant le milieu (alluvions, tuf, granite, sel).

Les dimensions de la cavité dans ces différents milieux peuvent être évaluées par la formule :

$$R_C = 52 \frac{\alpha^{1/3} W^{1/3}}{(\rho gh + C_S)^{1/3} \gamma} \quad [\text{réf. 5}]$$

où R_C = rayon de cavité en mètres

W = énergie de l'engin en kilotonnes

α = coefficient lié aux dimensions de la chambre de tir (ce coefficient est égal à 1 pour les engins directement couplés au milieu)

ρ = densité du milieu en g/cm³

h = hauteur des terrains à la verticale du point d'explosion en mètres

C_S = coefficient de structure lié au milieu variant entre 0 et 250 bars

γ = coefficient d'expansion adiabatique des gaz formés par la roche vaporisée, compris entre 1,03 et 1,14, suivant les milieux.

La valeur du coefficient d'expansion adiabatique dépend beaucoup de la teneur en eau du milieu (ex : pour une roche granitique avec 0 % d'eau, $\gamma \approx 1,03$; avec 10 % d'eau $\gamma \approx 1,11$ [réf. 6]) ce qui entraîne que le rayon de cavité dépend, en particulier, de la teneur en eau du milieu.

La figure n° 4 illustre le processus de formation de la cavité pour un tir de une kilotonne dans une roche dure.

a) entre l'instant zéro et quelques microsecondes, il y a formation d'une boule de feu puis d'une onde de choc puissante au niveau des parois. Comme on l'a exposé plus haut, le milieu environnant la chambre n'est pas encore perturbé.

b) au bout de quelques dizaines de microsecondes, l'onde de choc s'est propagée dans le milieu et sa pression ayant diminué jusqu'à la pression de vaporisation, elle a créé au sein du milieu une cavité remplie de gaz à haute température.

c) au bout de quelques centaines de microsecondes la pression de l'onde de choc a évolué jusqu'à la pression de fusion du milieu. Les gaz des roches vaporisées ont alors commencé

- Figure 4 -
Formation de la cavité

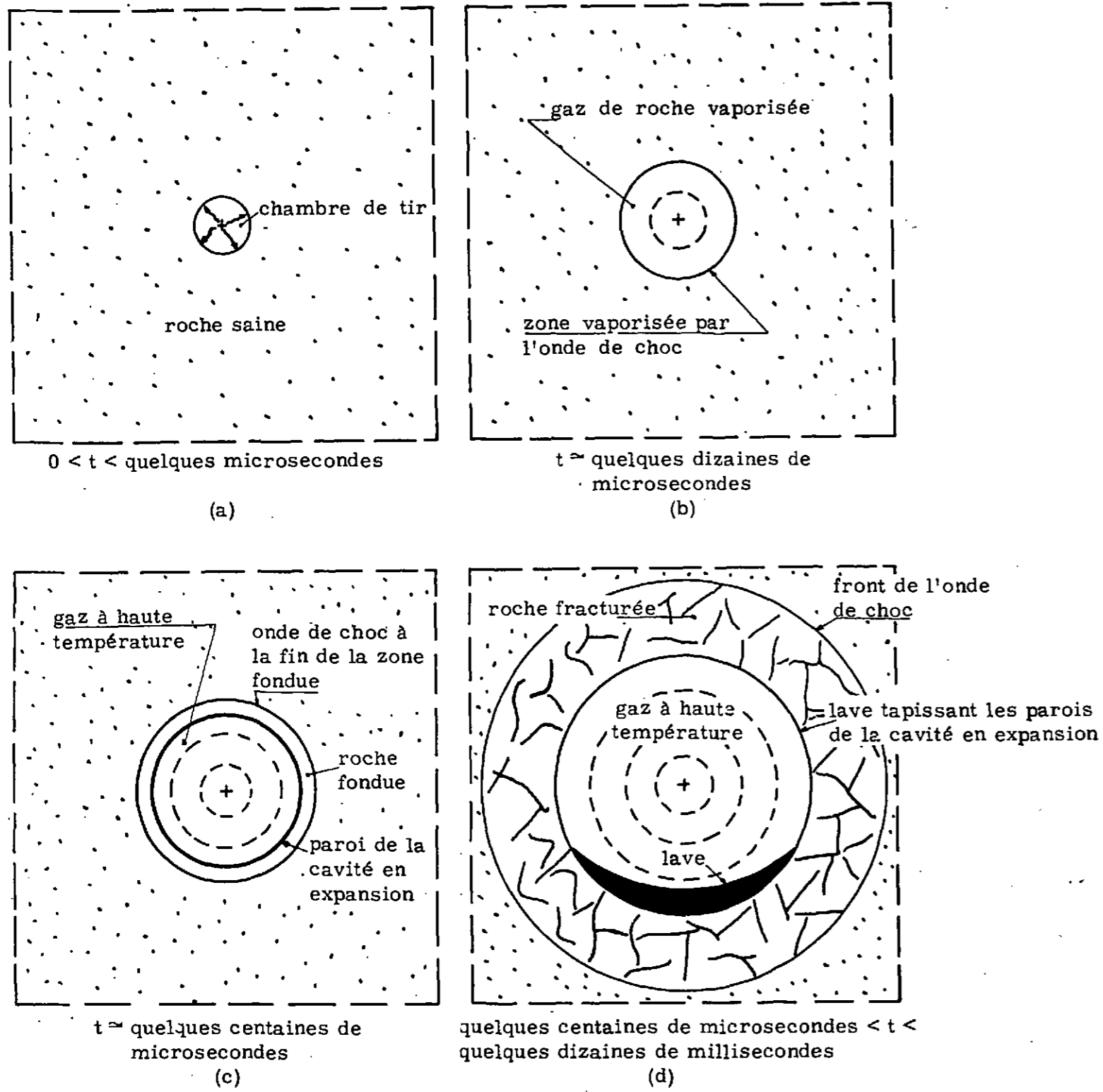
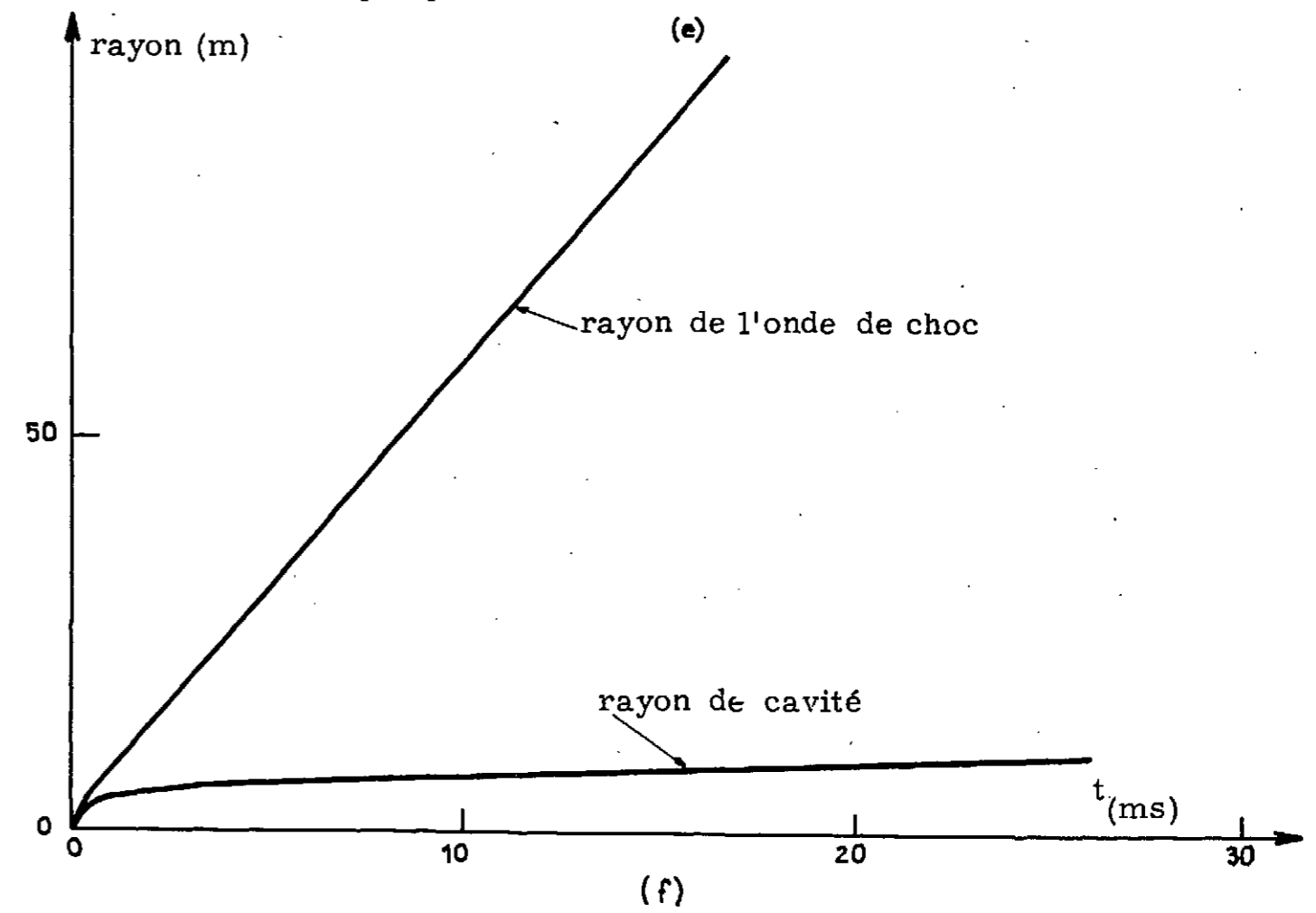
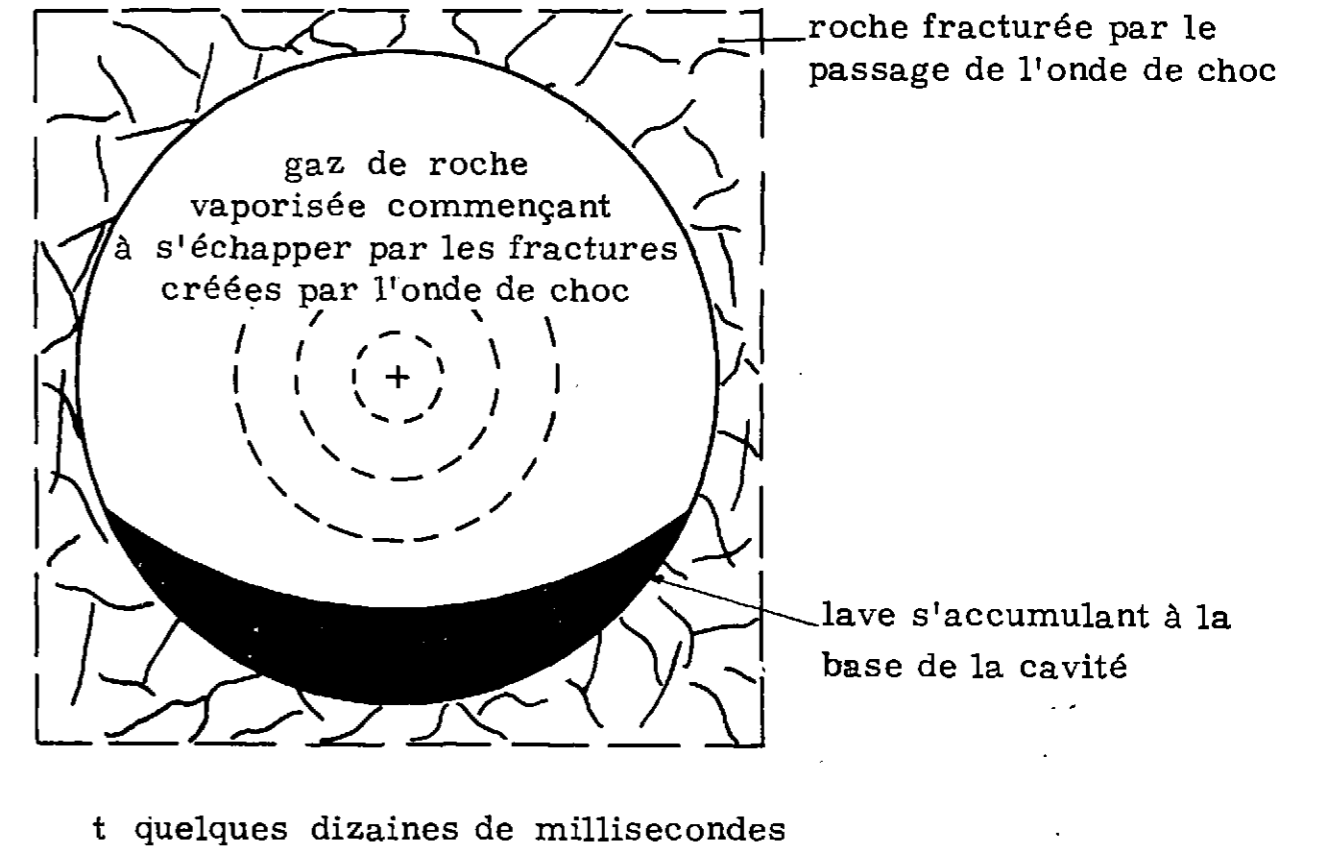


Fig. 4 (suite)



à se détendre adiabatiquement et la cavité dont les parois sont en expansion est tapissée de roches fondues (ou lave).

d) entre quelques centaines de microsecondes et quelques dizaines de millisecondes, alors que l'onde de choc continue à se propager en fracturant le milieu, les gaz continuent leur expansion quasi adiabatique jusqu'à ce que leur pression soit compensée par la pression exercée par les terrains de couverture.

e) quelques dizaines de millisecondes après l'instant zéro la cavité se stabilise ; la lave qui tapissait les parois au cours de l'expansion coule et s'accumule au fond. Les gaz s'échappent à travers la roche fissurée qui entoure la cavité et leur pression diminue lentement. La cavité n'est pas stable très longtemps ; lorsque la pression des gaz n'est plus suffisante pour maintenir en place la roche pulvérisée et fracturée, le toit s'effondre entraînant la formation d'une zone d'éboulis qui gagne en hauteur.

2. Formation de la cheminée

La zone broyée et la zone fracturée ont une forme grossièrement sphérique tant que la pression des gaz maintient en place les roches pulvérisées. Au bout d'un temps variant de quelques minutes à quelques heures, il y a effondrement de la voûte et des roches altérées qui la surmontent. Il se forme une cheminée qui se stabilise soit par équilibre de la nouvelle voûte dans la roche saine, soit par remplissage complet de la cavité par foisonnement des éboulis.

A la base de la cavité, les blocs effondrés se mélangent à la roche liquéfiée en subissant une fusion partielle. Au-dessus, ils s'accumulent en formant un ensemble à très grande perméabilité et porosité. Il y a souvent création de vides surtout dans la partie supérieure (fig. 5).

La forme et la hauteur de la cheminée ainsi que les dimensions des éboulis dépendent d'une part de l'énergie de l'explosion mais essentiellement de la nature de la roche et de son degré de fracturation antérieure au tir. Dans un terrain friable la cheminée peut se propager de proche en proche et atteindre la surface en formant un petit cratère d'effondrement (fig. 6). Dans le sel [réf. 7] il se forme une cheminée presque sphérique et dont le diamètre est légèrement supérieur à celui de la cavité avant l'effondrement (fig. 7).

Les observations faites sur les carottes de sondage au Sahara, ou les examens à l'aide de caméras de télévision [tirs américains Hardhat et Handcar, réf. 8] ont permis de constater que les dimensions des éboulis étaient très variables. Dans le granite du Sahara on rencontre à la hauteur du point d'explosion des blocs de granite sains ou même des roches broyées dépassant 1 mètre de côté. Vers le sommet de la cheminée, les échantillons recueillis ressemblent à du ballast dont les éléments n'excèdent pas quelques centimètres.

La radioactivité résiduelle est essentiellement contenue dans la roche fondue puis solidifiée (dite roche vitrifiée ou lave).

La température dans la zone cavité-cheminée évolue rapidement en fonction de l'humidité du terrain. La présence d'eau accélère les échanges entre la roche chaude et les zones froides par le cycle vaporisation, condensation, ruissellement et revaporisation. Dans le cas d'un milieu anhydre, les échanges de chaleur sont très lents [réf. 9]. Vers la partie inférieure de la cavité (jusqu'à quelques mètres autour du point d'explosion pour 1 kt) dans les

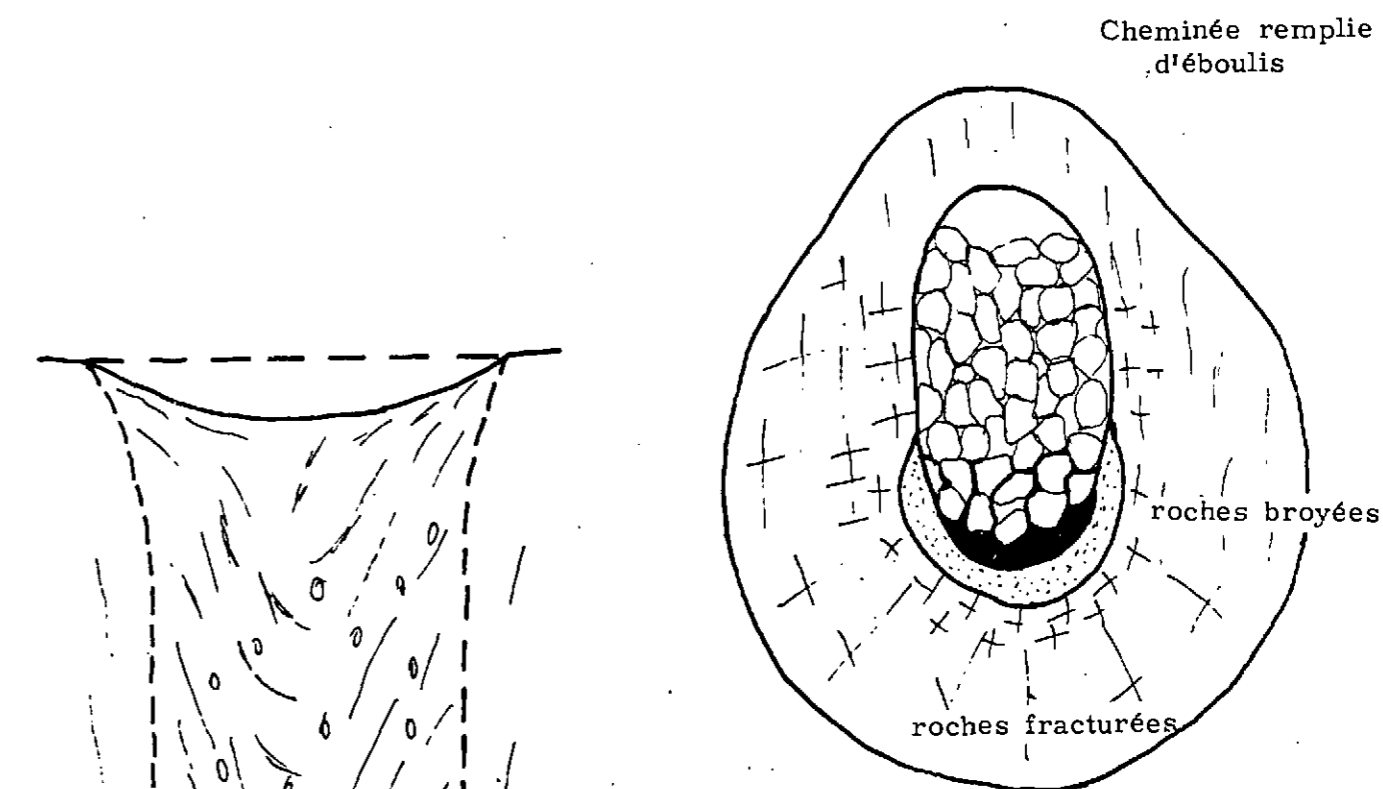


Figure 5 : Explosion dans le granite (Sahara)
W : 1 kt.

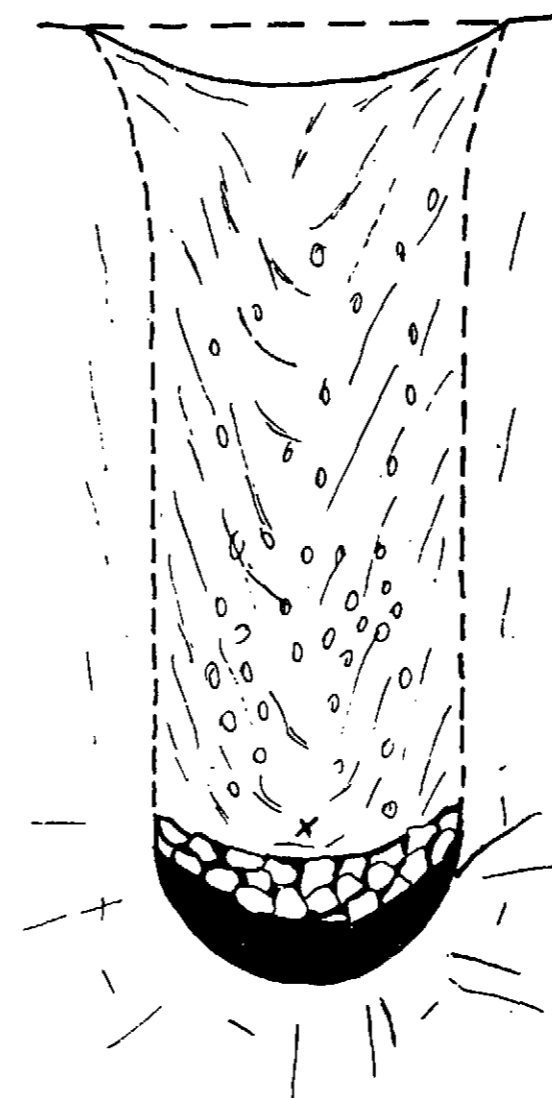


Figure 6 : Explosion dans le tuf
W : 1 kt.
L'effondrement se propage jusqu'en surface.

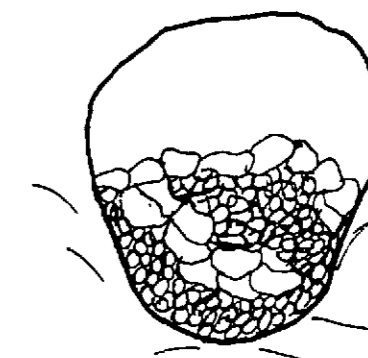


Figure 7 : Explosion dans le sel
W : 1 kt.

Echelle en mètres
10 20 30

zones contenant des roches vitrifiées; la température est de l'ordre de plusieurs centaines de degrés plusieurs années après le tir [réf. 10].

Autour de la cheminée, outre la fracturation provoquée par l'onde de choc, il peut se produire une fracturation secondaire due à la modification du champ de contraintes du milieu.

L'éboulement de la cheminée et les fracturations augmentent la perméabilité du milieu dans des proportions considérables (100 à 1 000 fois suivant les milieux) lors d'explosions simultanées.

Aucune donnée n'est disponible actuellement dans ce domaine mais il est intéressant de mentionner ce problème car les applications des explosions nucléaires aux exploitations minières pour le foudroyage en masse de minerai peuvent conduire à utiliser des séries d'explosions rapprochées. Suivant l'intervalle des tirs, il y aura des interférences entre les différentes zones de dégâts avec renforcement des effets en particulier dans les zones à fractures par tension.

Dans des conditions très particulières de propagation des ondes sismiques, il pourra se produire des phénomènes d'interférence provoquant localement un accroissement important des dégâts.

Dans le cas de tirs successifs rapprochés, il peut y avoir renforcement des effets d'un tir dans une zone ayant subi des altérations dues à un autre tir [réf. 11].

Si une explosion a lieu à proximité d'un milieu altéré par un tir précédent, suivant la distance des deux points de tir plusieurs cas peuvent se présenter.

Si les zones broyées et fracturées définies précédemment se recoupent, les effets sont amplifiés, les perméabilités augmentent, mais les problèmes miniers de creusement de galeries restent semblables à ceux d'une seule explosion.

Si les deux tirs sont plus éloignés, le deuxième tir va augmenter la fracturation due au premier tir, et il va y avoir extension de la première zone fracturée.

Quand les zones à contraintes permanentes se recoupent, si les contraintes s'ajoutent, il pourra y avoir rupture de la roche et donc extension importante de la zone fracturée, qui sera supérieure à la somme des deux zones fracturées créées dans le cas où les deux tirs n'auraient aucune interférence. De même, la zone finale à contraintes résiduelles pourra être étendue, et provoquer des difficultés lors de travaux miniers postérieurs.

Par contre, on peut rencontrer un effet d'atténuation dans le cas de tirs inégaux. Si on produit un tir puissant à proximité d'une cavité provoquée par un tir plus faible, la zone primitivement altérée peut subir de gros dommages, mais fait écran en absorbant une grande quantité d'énergie par dégradation et amortissement par chocs dans les éboulis et les zones fracturées (fig. 8).

IV - EXPLOSIONS FORMANT UN CRATERE

Il y aura un cratère lorsque l'explosion souterraine produira une déformation importante de la surface du sol au-dessus du point de tir. Cette déformation résulte d'une action conjuguée de l'onde de choc et de la poussée des gaz contenus dans la cavité et se traduit par une éjection de matière, un effondrement du sol ou un foisonnement conduisant à un dôme (cratère inversé).

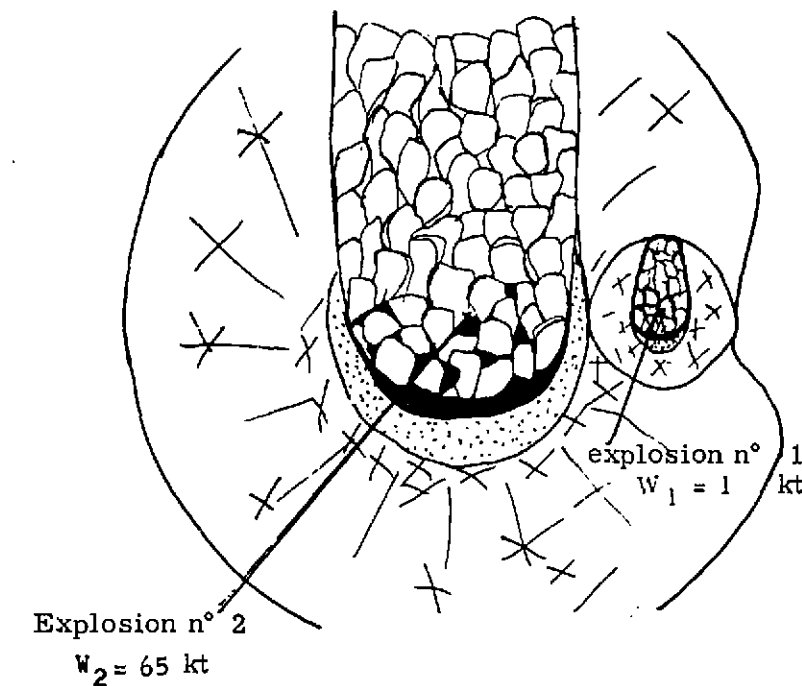


Fig. 8

Dissymétrie introduite par la présence d'une première explosion

1. Effets de l'onde de choc

L'explosion crée une onde de choc sphérique qui se transforme rapidement en onde de compression élastique et obéit aux lois de propagation sismique. En atteignant la surface il y a réflexion et écaillage [réf. 4]. L'application de ces lois dans le cas général est difficile mais si l'on admet qu'à partir d'une certaine distance l'onde sphérique peut être assimilée à une onde plane se réfléchissant sur une surface plane en onde de détente, et suivant le profil du front il y a formation d'un phénomène d'écaillage de la surface avec projection des écailles.

L'épaisseur, le nombre d'écailles et leur vitesse de projection sont fonction de la longueur et du profil de l'onde de compression, de la résistance à la traction du matériau et de la vitesse sismique dans le cas d'un milieu homogène. Quand le milieu est pulvérisé ou fracturé il y a réflexions multiples et dégradation de l'énergie par chocs successifs. Le phénomène d'écaillage est alors inexistant ou difficile à observer.

Dans le cas d'un sable, il y a projection des grains avec une vitesse égale au double de la vitesse de la matière :

$$V_p = \frac{2 \sigma}{\rho C}$$

V_p = vitesse des particules

σ = amplitude du choc

ρ = densité du milieu

C = vitesse de propagation de l'onde dans le milieu

Entre le point d'explosion et la surface, en un point du front de choc, il existe une

composante de compression radiale et deux composantes perpendiculaires qui sont des composantes de traction.

Quand la valeur de ces composantes de traction dépasse la somme de la cohésion du matériau et de la composante des contraintes naturelles du milieu, il y a rupture du matériau. La direction moyenne des fractures ainsi formées est radiale (fig. 9).

Figure 9 : Fracturation de la roche

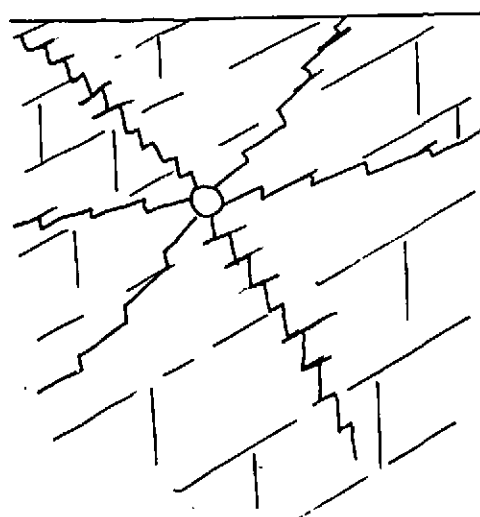
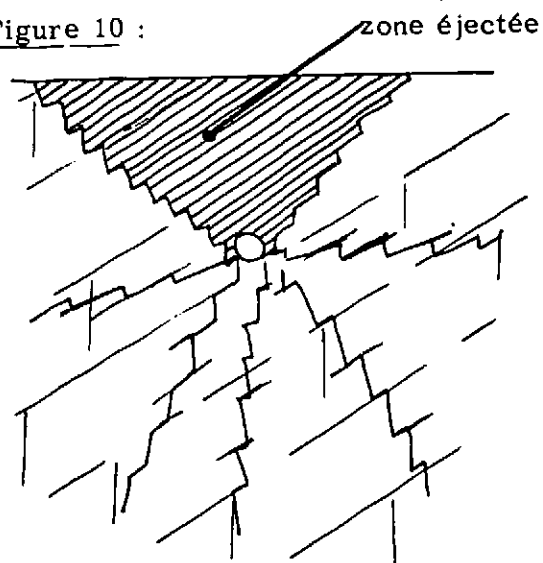


Figure 10 :



Si la poussée des gaz est supérieure au poids des terrains de couverture il y a projection de la masse de roche comprise dans un cône de rupture (fig. 10). Le volume mis en jeu dépend, d'une part, de la densité de la roche et, d'autre part, du coefficient de frottement des fractures dues à l'onde de choc [réf. 12].

2. Effets de l'expansion des gaz [réf. 12]

Les gaz provenant de l'explosion et de la vaporisation du milieu, se détendent adiabatiquement en repoussant les parois de la cavité. Dans le cas de tirs à faible profondeur (explosion ncn contenue), l'onde de choc provoque l'écaillage et communique aux terrains au-dessus de l'explosion un mouvement vertical. D'autre part, la zone des roches fracturées par l'onde de choc atteint la surface ou en est très proche, et ainsi la résistance à l'expansion des gaz est plus faible en direction de la surface que dans les autres directions. Ces éléments provoquent une expansion dissymétrique de la cavité qui se développe préférentiellement vers la surface libre.

Pour un engin de puissance donnée, trois cas peuvent se présenter suivant la profondeur d'explosion et le milieu dans lequel a lieu le tir :

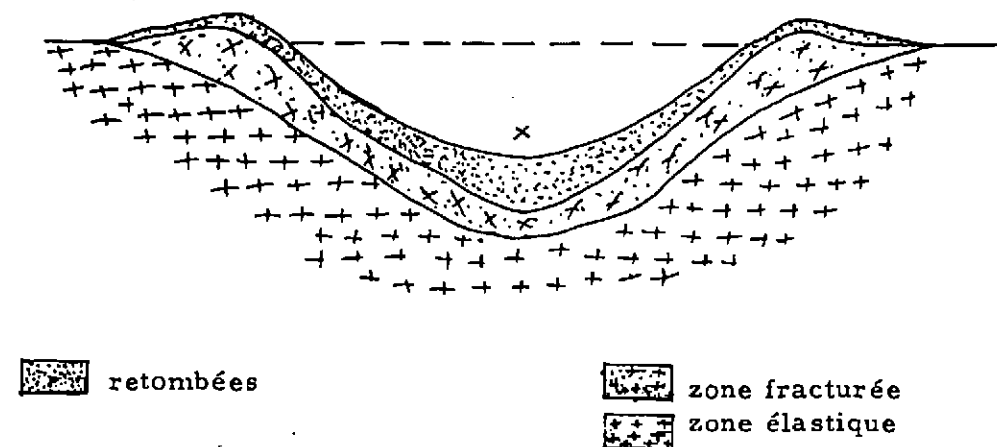
a) Faible profondeur d'explosion (jusqu'à 20 m pour 1 kt)

L'effet de l'onde de choc et de l'écaillage est prépondérant sur celui de la

poussée des gaz. En effet, l'onde de choc parcourt très rapidement la courte distance séparant le point d'explosion de la surface du sol en s'atténuant très peu et en provoquant un écaillage important, de telle sorte que le sol est mis en mouvement avant que la phase d'accélération due aux gaz ne se soit produite.

La profondeur d'explosion pour laquelle l'effet de l'onde de choc demeure prépondérant est plus grande pour les roches dures que pour les roches tendres (type alluvions) où l'onde de choc s'atténue plus vite.

Fig. n° 11 - Cratère par explosion à faible profondeur



La profondeur du cratère est plus grande que la profondeur d'explosion, toute la radioactivité a donc été dispersée dans les retombées.

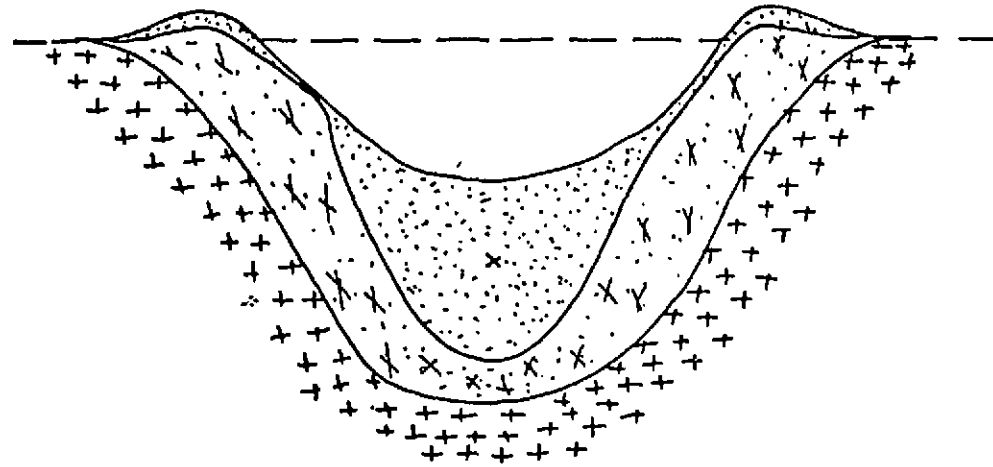
b) Profondeur d'explosion moyenne (20 à 60 m pour 1 kt).

Avant d'atteindre la surface, l'onde de choc a perdu une grande partie de son énergie et l'écaillage reste superficiel. La mise en mouvement et l'éjection des terrains qui surmontent le point de tir sont dues essentiellement à la poussée des gaz contenus dans la cavité.

La profondeur du cratère étant plus faible que la profondeur d'explosion, une partie de la radioactivité reste confinée au voisinage immédiat du point d'explosion.

Pour une puissance donnée, le domaine de profondeur où l'action des gaz sera prépondérante est plus étendu pour les alluvions que pour les roches dures.

Fig. n° 12 - Cratère par explosion à profondeur moyenne

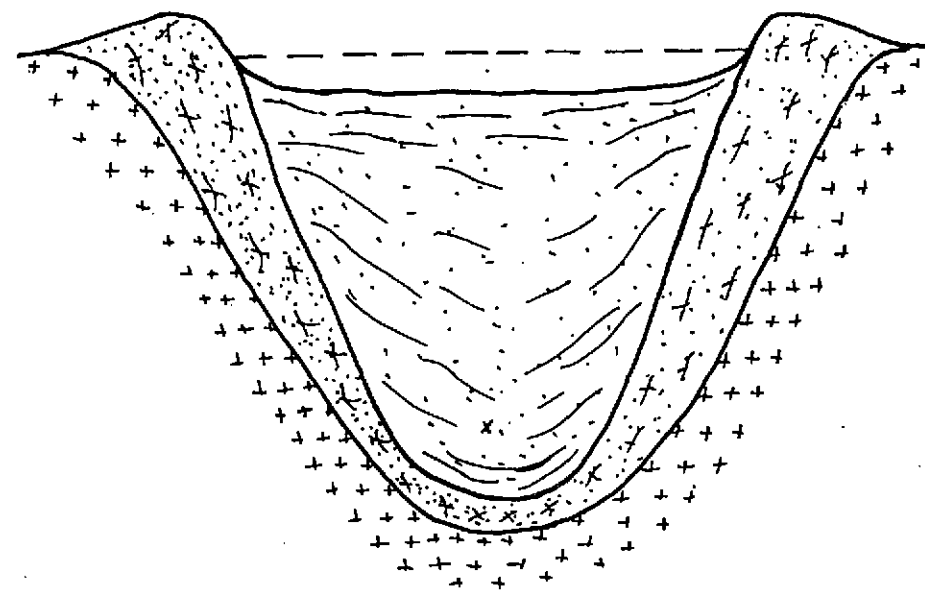


c) Grande profondeur d'explosion (supérieure à 50 à 60 m pour 1 kt).

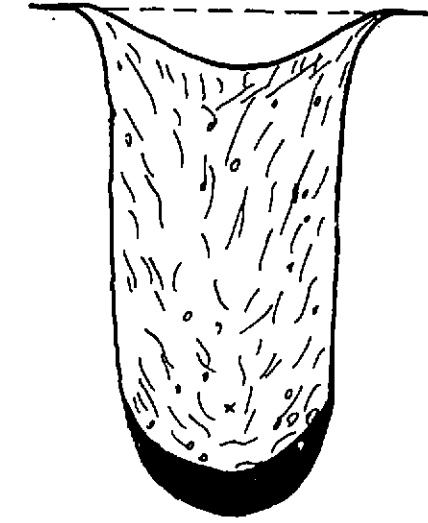
L'action de l'onde de choc redevient la plus importante, car la pression lithostatique des terrains au-dessus du point d'explosion devient un obstacle à l'expansion de la cavité.

Dans les roches dures apparaît alors un dôme ou cratère inversé essentiellement dû à l'écaillage de surface (fig. 13). Pour des milieux où la cohésion est faible, apparaît un cratère d'effondrement, encore appelé de subsidence, dû au prolongement de la cheminée jusqu'à la surface (fig. 13). Ce type de cratère n'a été observé que dans les alluvions et jusqu'à des profondeurs réduites de $150 \text{ m/kt}^{1/3}$.

Fig. n° 13 - Explosion à grande profondeur

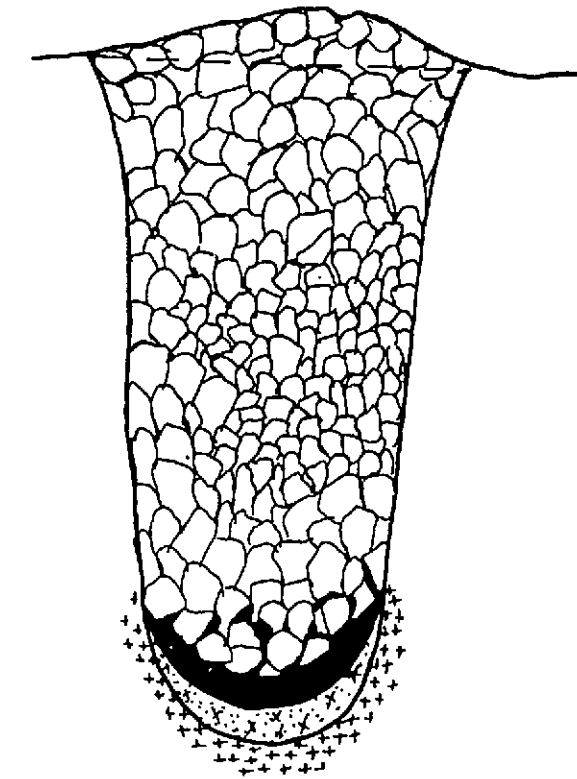


(a) explosion profonde avec petit cratère



(b)

Cratère d'effondrement par explosion profonde (cas des alluvions)



(c)

Cratère inversé - Explosion profonde cas des roches dures

La totalité de la radioactivité est pratiquement confinée au voisinage du point d'explosion et celle décelable sur les contours du cratère est faible.

3. Importance relative de l'onde de choc et de l'expansion des gaz en fonction de la profondeur d'explosion

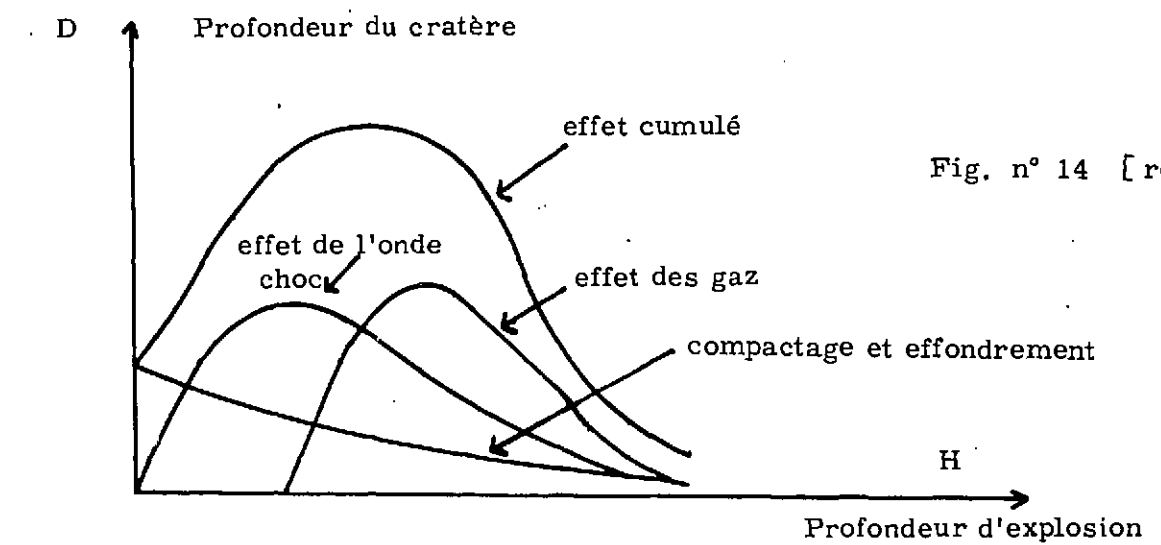


Fig. n° 14 [réf. 21]

Cette figure qualitative montre que pour une explosion de puissance donnée, si on cherche à obtenir une profondeur maximum de cratère, il existe une profondeur d'explosion optimale à respecter (effet cumulé). Cette profondeur optimale correspond d'ailleurs aux cas des explosions où l'effet des gaz est prépondérant.

4. Définition des dimensions et zones d'un cratère formé par éjection de matière (explosion à profondeur moyenne) [réf. 12]

La figure n° 15 schématise la zone plastique à déplacements permanents qui est pratiquement inexistante dans les roches dures, puis la zone fracturée qui pour des milieux rocheux est mal définie. Il est à remarquer que par suite de la formation des zones précédentes le niveau initial de la surface du sol est soulevé au voisinage des bords du cratère.

A l'intérieur du cratère, la zone des retombées est constituée par une partie des blocs et de la poussière projetés en l'air.

Les terrains soulevés en masse sur les bords du cratère vrai et recouverts par les retombées extérieures ou "éjecta" forment une protubérance appelée "lèvre" du cratère. Si R est le rayon du cratère apparent, le rayon du sommet de la lèvre varie entre $1,25 R$ et $1,5 R$ et la hauteur est comprise entre $0,1 R$ et $0,5 D$ suivant la nature du terrain : D étant la profondeur du cratère apparent [réf. 12].

La limite entre la zone fracturée et la zone de retombées forme le "cratère vrai". Les contours de la zone de retombées forment le "cratère apparent".

La photographie n° 16 montre un cratère formé à la suite d'une explosion de 100 kt dans les alluvions à 193 mètres de profondeur [Essai SEDAN, exécuté dans le désert du NEVADA (USA) en 1962] [réf. 21].

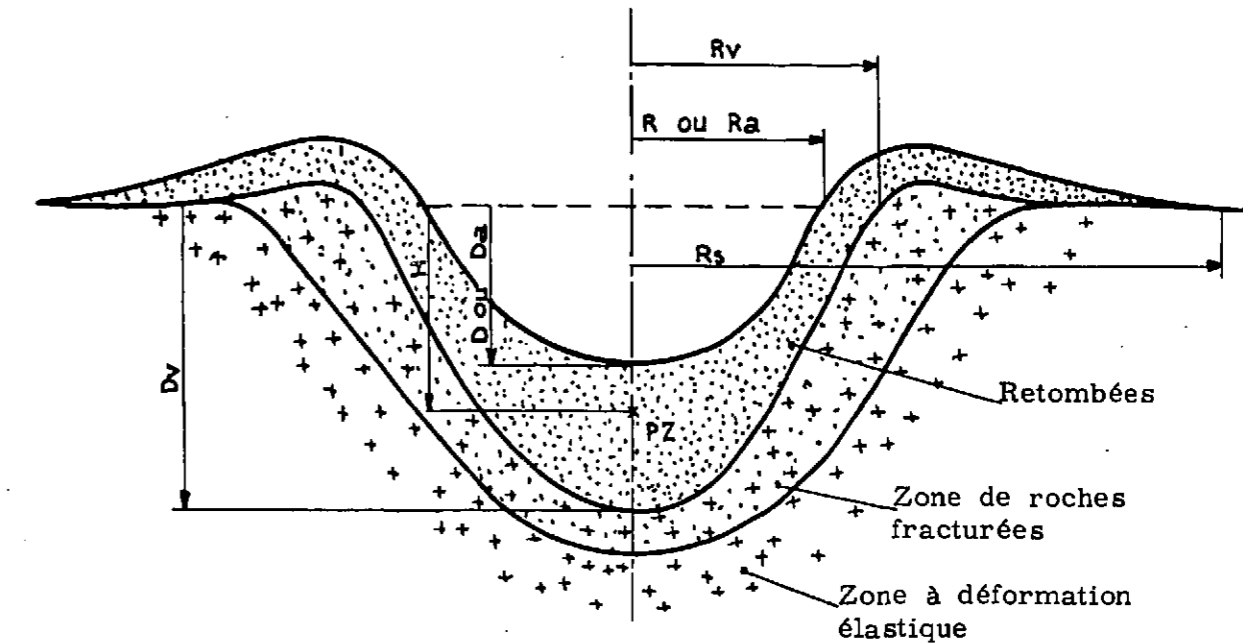
Retombées -

Les fragments et blocs de roches au-dessus et autour du point d'explosion sont projetés dans l'atmosphère et retombent soit dans le cratère, soit dans une zone concentrique à proximité du cratère : on les appelle alors souvent "éjecta".

Les dimensions des blocs de roches formant ces retombées dépendent :

- des fractures naturelles du terrain
- des propriétés physiques des roches
- de la puissance et de la profondeur d'explosion.

La figure n° 17 donne la distribution des dimensions des retombées pour une roche dure du type granite ou basalte dans laquelle 50 % des fractures naturelles seraient espacées de moins de 30 cm et 90 % de moins de 150 cm [réf. 12].



- Figure 15 -

(explosion d'1 kt à 40 m de profondeur dans le basalte)

PZ	:	Point zéro, emplacement de la charge
H	:	Profondeur d'explosion
R, Ra	:	Rayon du cratère apparent
Rv	:	Rayon du cratère vrai
Rs	:	Rayon extérieur des éjecta
D ou Da	:	Profondeur du cratère apparent
Dv	:	Profondeur du cratère vrai.

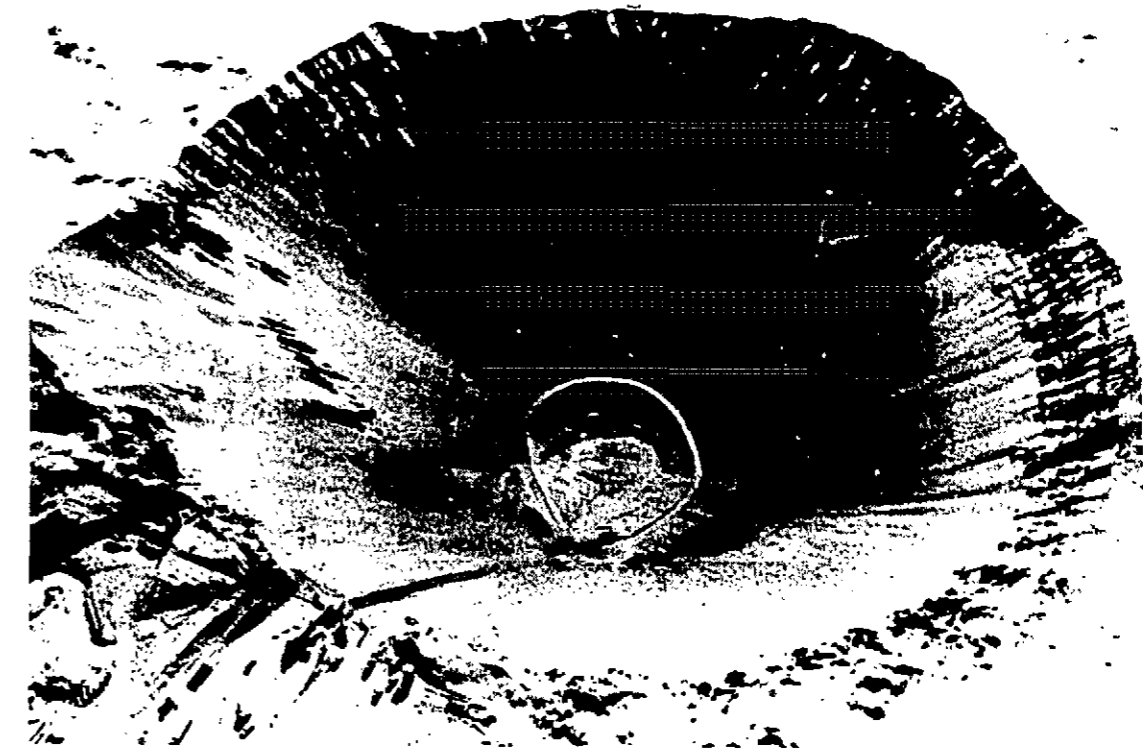
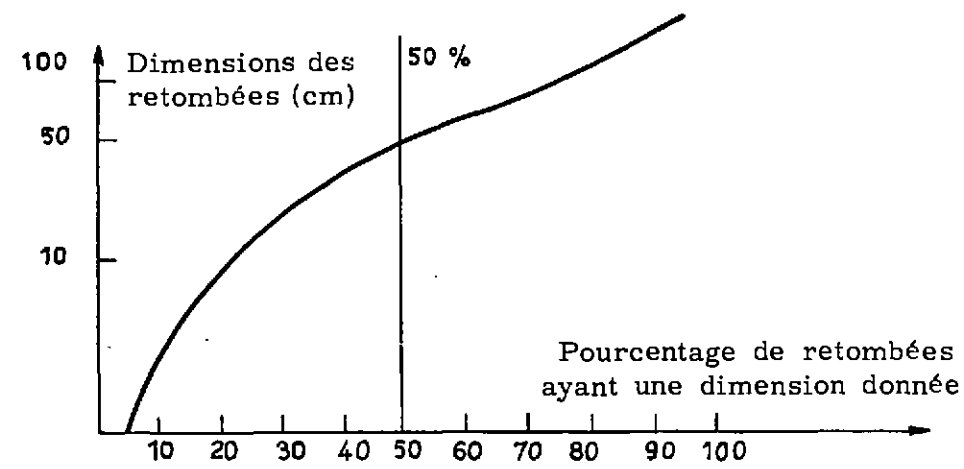


Fig. n° 16 - Cratère formé à la suite d'une explosion de 100 kt dans les alluvions à 193 m de profondeur [réf. 21].



- Figure 17 -

5. Stabilité des pentes

Le profil des pentes des cratères est essentiellement fonction de la nature du milieu dans lequel ils sont creusés [réf. 12].

Si l'on est capable de prédire avec exactitude le comportement du milieu soumis à une explosion nucléaire ou chimique, c'est-à-dire les dimensions des éclats de roche, leur forme, leur répartition à la retombée, leur trajectoire, on connaîtra la hauteur des talus, le compactage dû au tassement à la retombée. Connaissant encore la saturation en eau du cratère et de ses talus, le calcul de la stabilité se ramène à la résolution d'un problème de mécanique des roches, et on peut déterminer les profils d'équilibre et les variations de pente qui seront provoquées par la mise en eau du cratère par exemple.

Les pentes se forment par entassement du matériau projeté en l'air au moment de l'éruption. Plus la hauteur de chute des débris est élevée, plus le tassement est important. La valeur de l'angle de frottement interne est fonction de ce tassement et il est nécessaire d'essayer de la mesurer avant par des expériences de similitudes ou tout au moins aussitôt après le tir par des essais de cisaillement sur échantillons. L'angle de pente du talus est souvent voisin de la valeur de l'angle de frottement dans le cas des sables secs, ainsi les valeurs suivantes de l'angle sont mesurées :

- 28,5° pour un sable peu compact à grains arrondis,
- 46° pour un sable compact à grains anguleux.

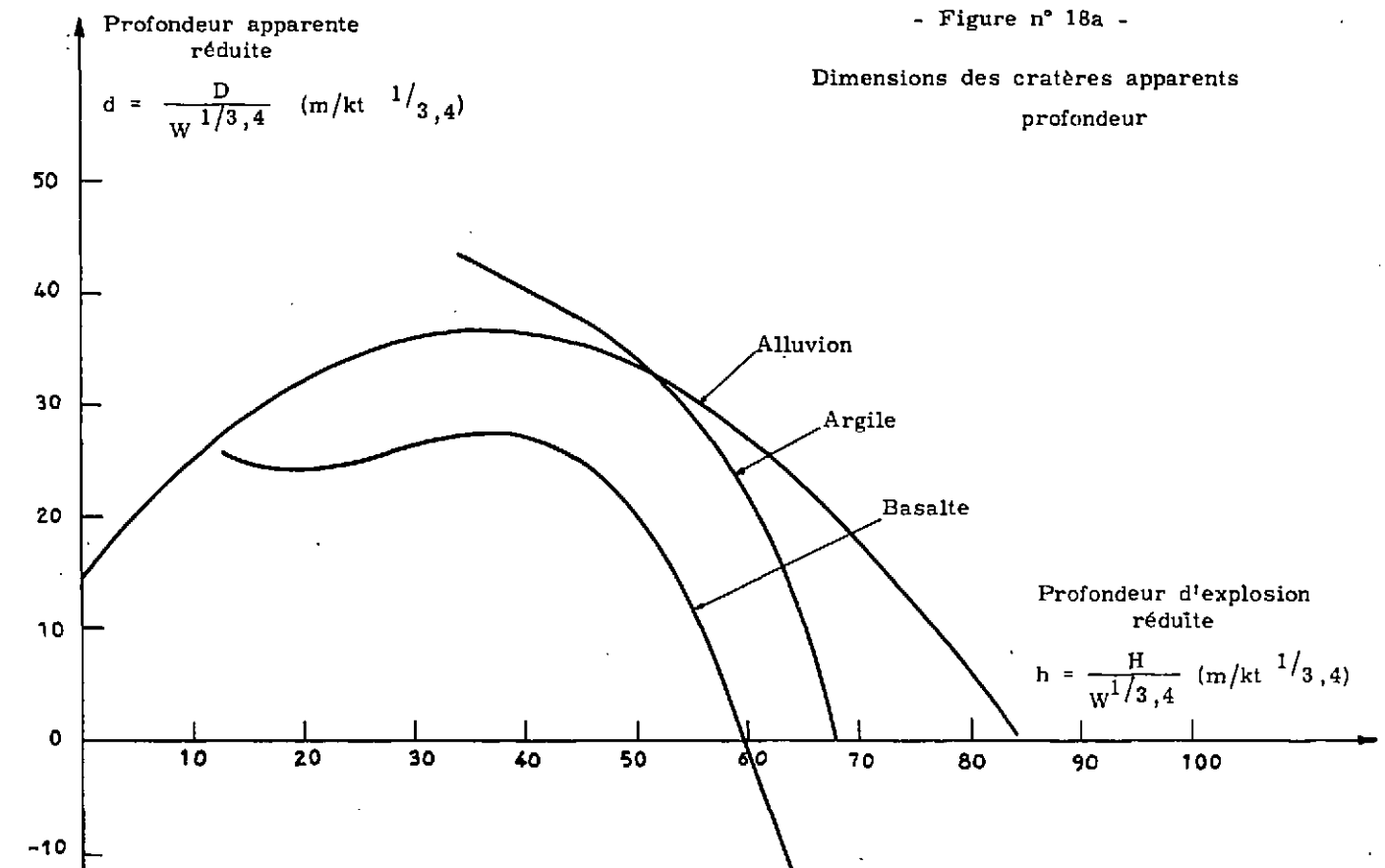
Si le sable est légèrement humide il y a des forces de capillarité qui créent une cohésion augmentant la résistance au cisaillement.

Dans le cas d'une argile l'angle peut descendre à 20°.

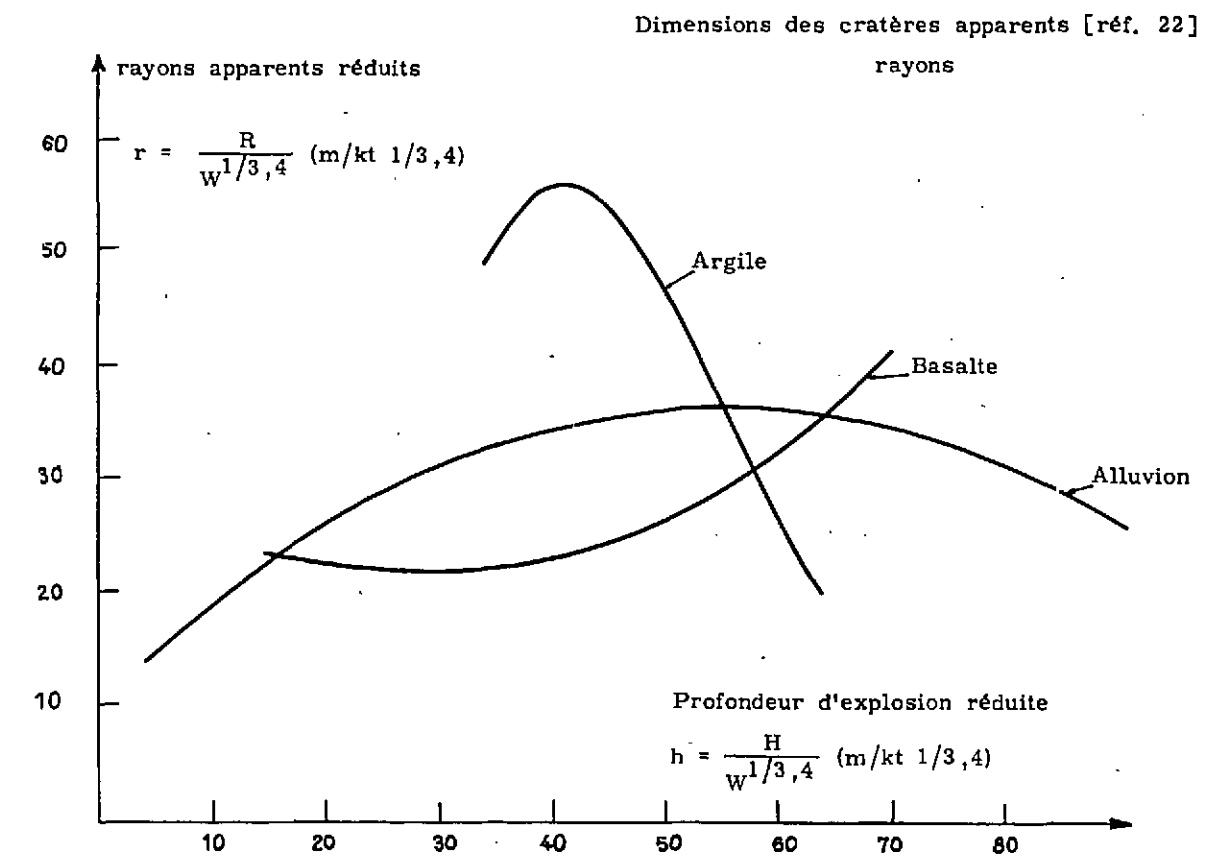
Pour les talus formés par entassement de blocs, la stabilité est beaucoup plus grande (l'angle de pente peut aller jusqu'à 70° et plus), et l'influence d'un fluide interstitiel est négligeable. De nombreuses expériences ont été réalisées aux Etats-Unis [réf. 15-16].

L'évolution de la pente des parois des cratères formés dépend des conditions d'utilisation : extraction des déblais, formation de lacs ou réservoirs artificiels, creusement de canaux avec courants unidirectionnels ou alternatifs (courant de marée), etc ...

Dans le cas de plusieurs cratères simultanés les effets sur les talus seront très



- Figure 18b -



importants et fonction de l'intervalle entre tirs. Les effets séismiques seront comparables à ceux qui se produiront dans le cas d'explosions contenues.

6. Dimensions expérimentales des cratères apparents

La figure n° 18 donne les dimensions des cratères apparents en fonction de la profondeur de l'explosion pour trois milieux : les alluvions, l'argile et le basalte [réf. 22].

Cette courbe est donnée en coordonnées réduites (dimensions ramenées à une énergie de 1 kt), elle est ainsi utilisable pour n'importe quelle énergie. Cependant, une étude des lois de similitude et des résultats expérimentaux des explosions ayant formé un cratère [réf. 12] montre que d'une façon générale la loi de similitude est en :

$W^{1/3}$ pour des énergies et des profondeurs d'explosions faibles

$W^{1/4}$ pour des énergies et des profondeurs d'explosions fortes.

La loi en $W^{1/3,4}$ est celle qui rend le mieux compte des résultats expérimentaux pour des énergies comprises entre 0,1 kt et 100 kt.

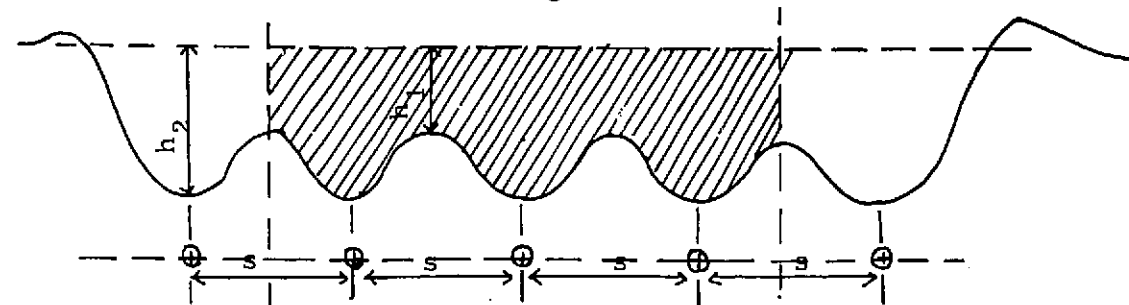
7. Cratères en ligne formant des tranchées [réf. 13, 14]

Les dimensions de la tranchée obtenue sont fonction de l'espacement entre les charges, de l'énergie unitaire des explosifs, de la profondeur d'enfouissement et du milieu et de sa configuration.

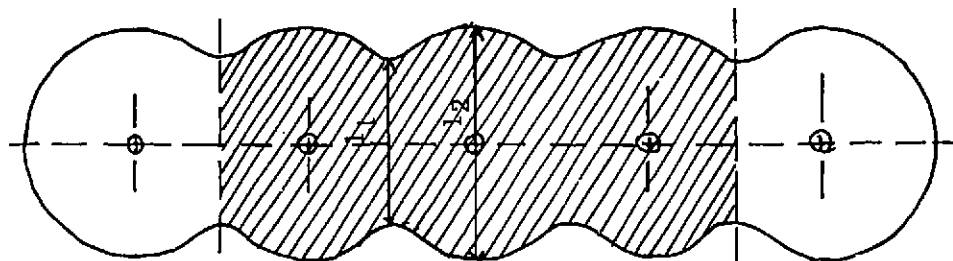
a) Forme de la tranchée obtenue par des explosions en ligne

Suivant l'espacement des charges, le fond de la tranchée est plus ou moins plat et les bords plus ou moins "ondulés" (fig. n° 19).

Fig. n° 19



(a) coupe



(b) vue de dessus

On définit pour la tranchée des dimensions apparentes moyennes :

$$\begin{aligned} \text{profondeur} : d &= \frac{\alpha_1}{3S} & \alpha_1 & : \text{aire hachurée fig. 19 (a)} \\ \text{largeur} : l &= \frac{\alpha_2}{3S} & \alpha_2 & : \text{aire hachurée fig. 19 (b)} \end{aligned}$$

La figure n° 20 [réf. 14] permet une comparaison entre explosions en série et cratère isolé ; elle montre que dans des alluvions, une profondeur d'explosion 12 % plus grande que la profondeur donnant un rayon de cratère maximum, conduit, lorsque l'espacement $S = R$, à une tranchée 10 % plus large qu'un cratère isolé.

Retombées

Pour des explosions en série, la densité des retombées autour de la tranchée est partout plus grande que pour les cratères isolés, sauf pour les extrémités de la tranchée où la densité est la même que pour le cratère isolé.

c) Lèvres [réf. 12 - 14]

Pour les alluvions, les lèvres de la tranchée sont plus hautes que pour les cratères simples. La différence varie avec, à la fois la profondeur d'explosion et l'espacement des charges.

Pour un espacement d'un rayon et une profondeur d'explosion 15 % plus profonde que l'optimum, la lèvre de la tranchée est 2,3 fois plus haute que pour le cratère isolé.

Pour le basalte, les lèvres sont, sur les bords de la tranchée, 65 % plus hautes que pour un cratère isolé, mais elles disparaissent aux extrémités.

8. Phénomènes secondaires se manifestant lors d'une explosion formant un cratère.

Les phénomènes qui sont décrits dans ce paragraphe ne sont dénommés secondaires que parce qu'ils ne sont pas directement liés à la forme du cratère ; mais dans le cas d'utilisation des cratères par explosif nucléaire à des fins industrielles, ils deviennent alors très importants du point de vue de la sécurité puisqu'il s'agit de l'onde de pression aérienne et du nuage plus ou moins radioactif formé au moment de l'éjection du matériau.

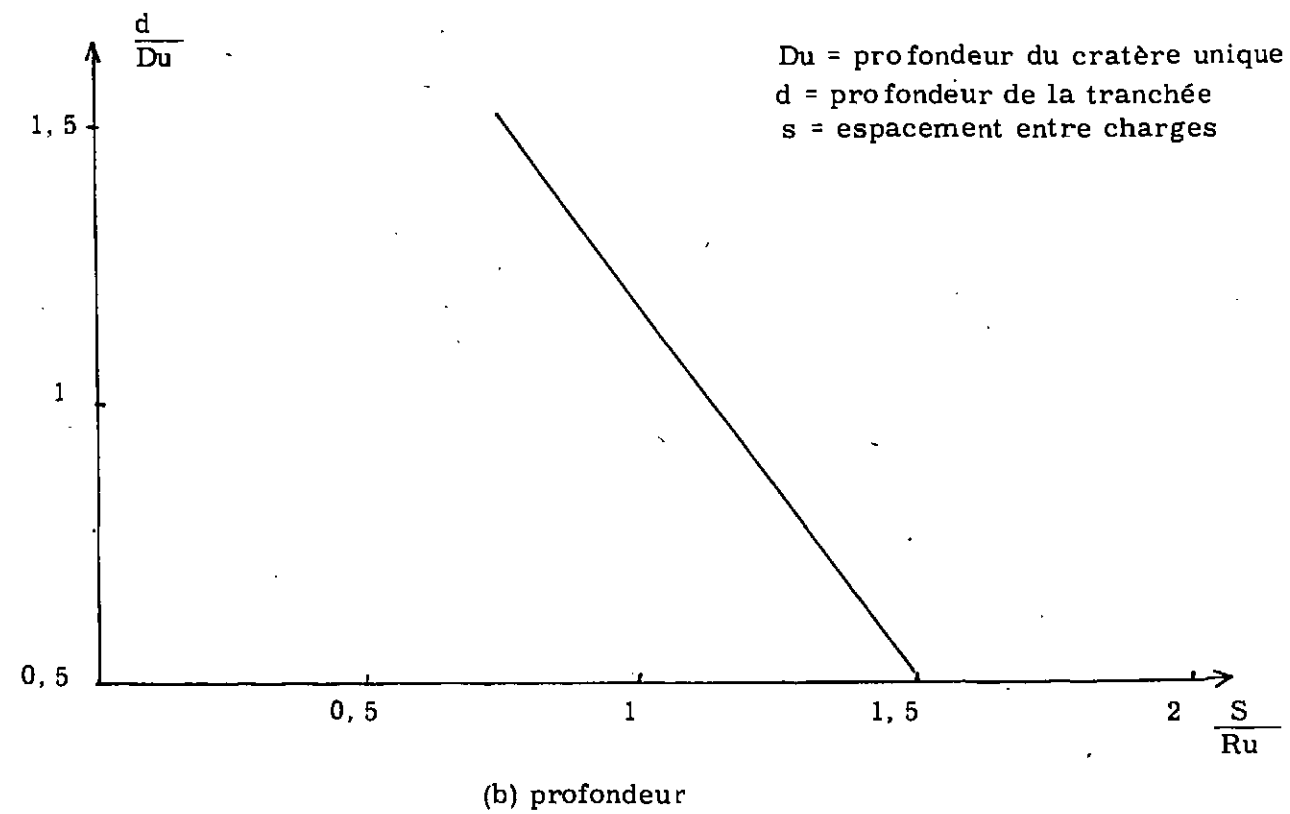
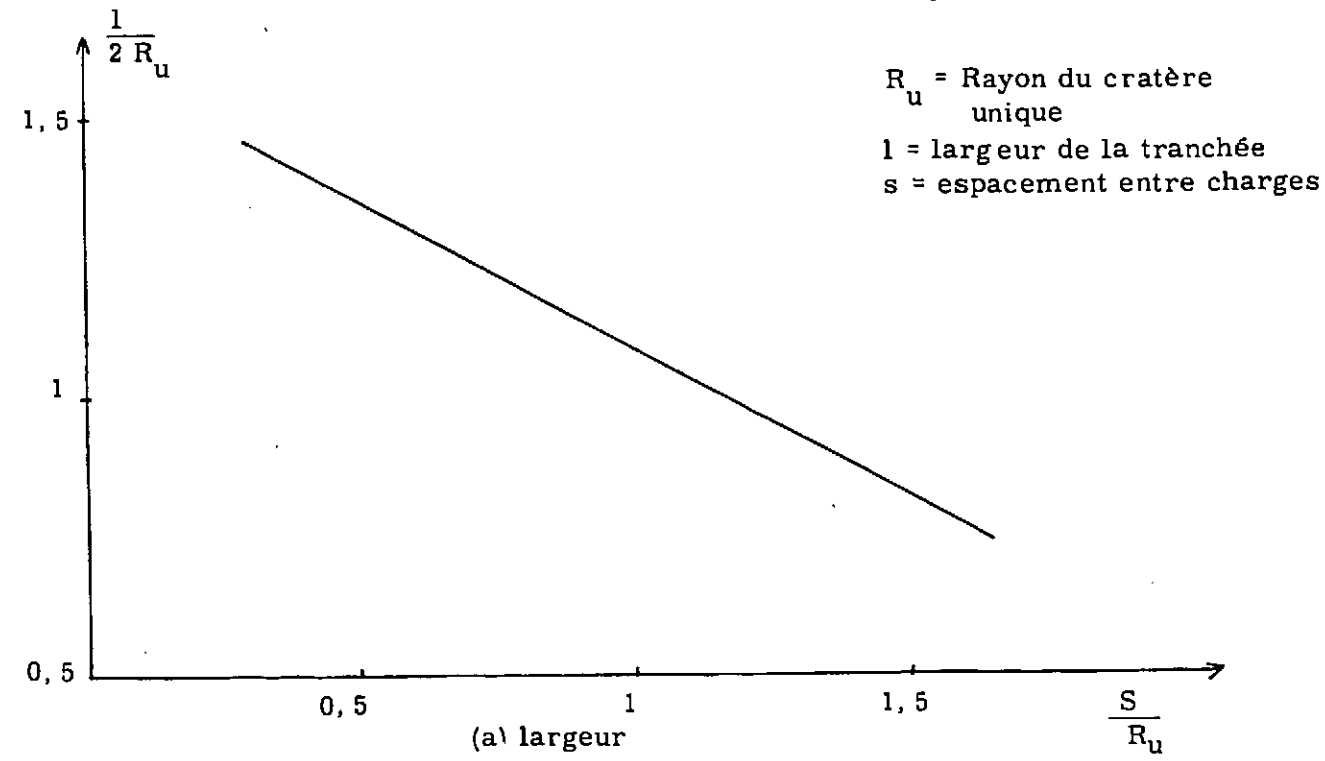
a) Onde de pression aérienne

Le mouvement de la surface du sol au-dessus du point d'explosion tel qu'il a été décrit dans les chapitres précédents donne naissance à une onde de pression aérienne. Cette onde de pression peut avoir trois origines différentes :

- l'onde transmise du sol à l'air lors du phénomène d'écaillage,
- l'onde créée par "l'effet de piston" dû au mouvement du sol sous l'action des gaz,
- l'onde de choc formée par la brusque détente des gaz lorsqu'ils s'échappent dans l'atmosphère.

L'importance et l'instant d'apparition de chacune de ces trois ondes de choc sont différents et dépendent de la nature du milieu et des caractéristiques de l'explosion (énergie,

Fig. n° 20 [réf. 14] - Dimensions relatives des tranchées dans les alluvions.
Cas des tirs en ligne.

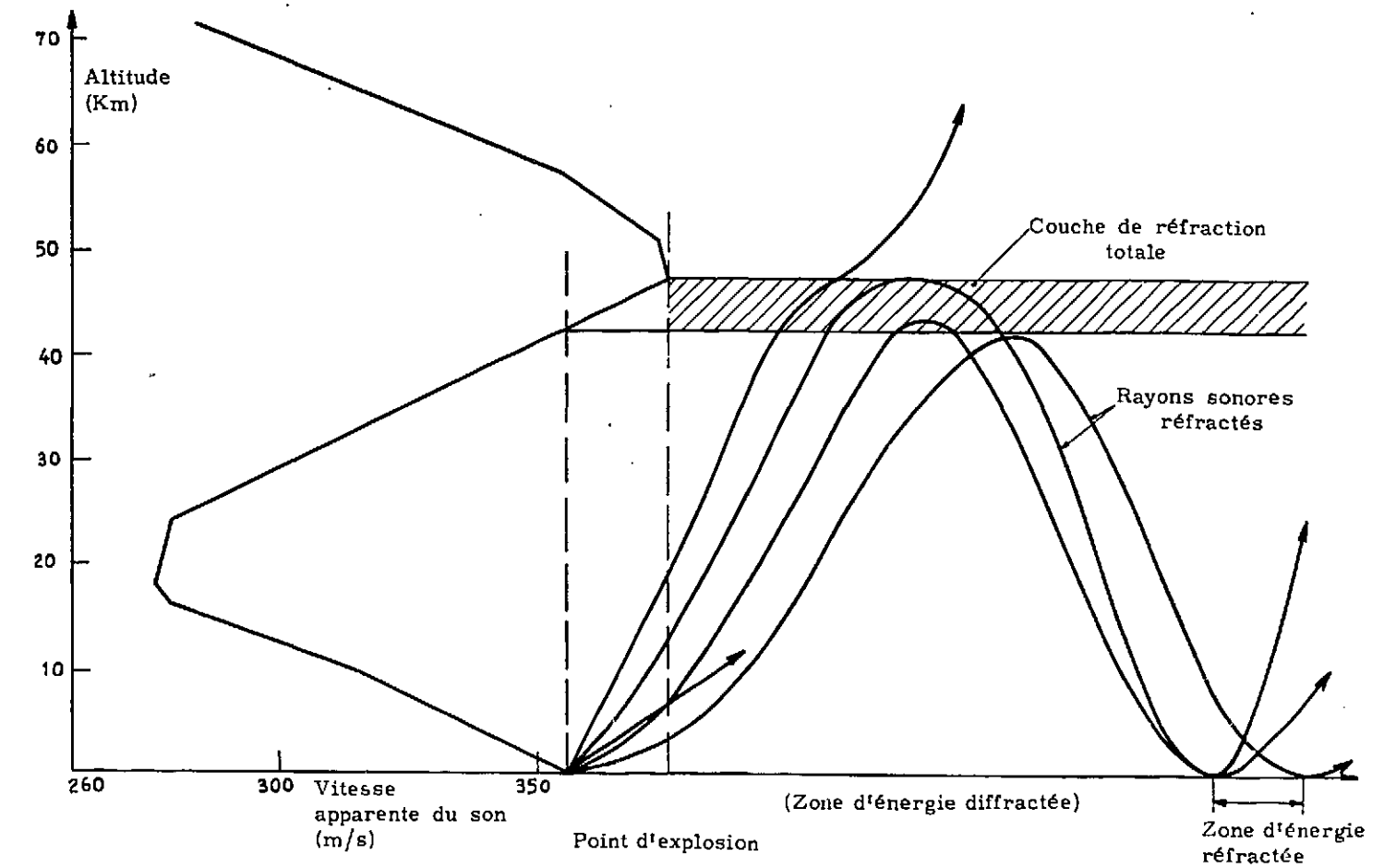


profondeur ...).

Pour des cratères formés par des explosions à profondeur moyenne, l'onde de pression aérienne la plus intense est généralement celle issue de la détente des gaz dans l'atmosphère. Son intensité est telle que, par exemple, on estime que pour une explosion de 10 Mt en cratère des vitres pourraient être brisées dans certaines conditions météorologiques jusqu'à plus de 100 km du point d'explosion.

- effets de la réfraction atmosphérique [réf. 17]

Fig. n° 21 - Phénomène de réfraction atmosphérique et de focalisation des ondes de choc.



Dans certaines circonstances (vents en haute altitude, existence de zone d'inversion de température, ...) des réflexions et réfractions de l'onde de pression dans diverses couches atmosphériques peuvent entraîner au niveau du sol des surpressions bien supérieures à celles prévisibles par un simple calcul de propagation dans une atmosphère homogène. Ce phénomène dit "de focalisation" est calculable lorsque sont connues les caractéristiques physiques de l'air en fonction de l'altitude.

La figure n° 21 montre schématiquement ces phénomènes de focalisation à grande distance.

Ces ondes acoustiques peuvent même être enregistrées après avoir fait plusieurs fois le tour de la terre à la suite de réfractions et réflexions multiples.

b) Nuage

Au moment où les gaz de la cavité se détendent dans l'atmosphère, ils projettent en l'air une partie des terrains qui se trouvaient au-dessus du point d'explosion. La roche ayant été préalablement pulvérisée et fracturée, ces matériaux éjectés sont constitués par des blocs de roche dont la granulométrie varie de quelques mètres à quelques dixièmes de millimètres. Les particules les plus grosses retombent immédiatement dans le cratère ou aux environs immédiats en suivant les lois classiques de la balistique, les plus fines restent en suspension dans l'atmosphère et forment le nuage principal et le nuage de base (fig. 22).

 α) Nuage principal

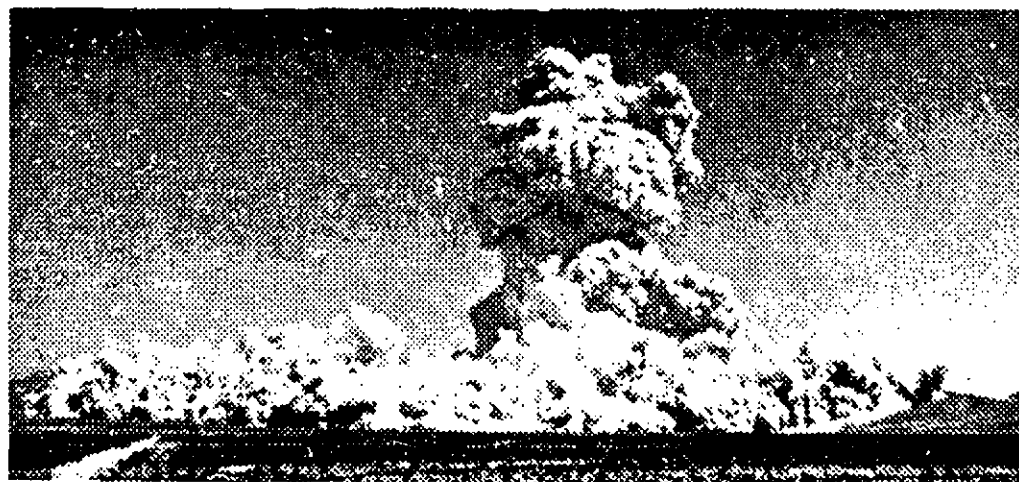
Ce nuage est très dense dans les premiers instants et contient les gaz de roches vaporisées et une partie de la radioactivité dégagée par l'explosion. Ses dimensions atteignent plusieurs centaines de mètres en hauteur et en diamètre, celles-ci variant avec l'énergie de l'explosion et la nature du milieu dans lequel elle a lieu.

Il peut se propager jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres du point de l'explosion.

 β) Nuage de base

Il est formé de poussières qui restent en suspension pendant quelques dizaines de minutes après l'explosion au voisinage du sol. Il se dépose tout autour du cratère, recouvrant le sol dans un rayon de quelques kilomètres d'une fine couche de poussières plus ou moins radioactives.

Fig. n° 22 - Nuage principal et nuage de base lors d'une explosion formant un cratère [réf. 21]



V - CONCLUSION

Les phénomènes principaux qui prennent place lors d'explosions nucléaires souterraines ont été décrits, dans le cas d'explosions contenues ou dans le cas de formation des cratères. Les effets sur l'environnement ont été sommairement exposés au cours de ce rapport car ils font l'objet de publications différentes. On a cependant rattaché de manière quantitative les phénomènes décrits aux effets produits.

Les actions de l'onde de choc et des gaz ont été dissociées et il est ainsi possible de mieux saisir la nature et l'ampleur des transformations irréversibles subies par le milieu. Cette connaissance des phénomènes devrait favoriser une appréciation plus complète des possibilités des explosifs nucléaires comme moyen d'action dans des applications industrielles relatives aux travaux pétroliers, miniers ou de génie civil.

REFERENCES

- [1] J. MAURY - C. LEVRET
Physique des phénomènes en zone proche des explosions nucléaires souterraines.
Rapport CEA - en cours de publication.
- [2] F. SUPIOT - J. BRUGIES
Calcul de l'onde de choc en zone proche d'une explosion nucléaire souterraine
(Méthode CADES).
Rapport CEA -R- 3736, 1969.
- [3] S. DERLICH -
Explosions nucléaires souterraines - Etude des zones fracturées - Rapport CEA en
cours de publication.
- [4] J.S. RINEHART
On fractures caused by explosions and impacts.
Quarterly of Colorado School of Mines, vol. 55, n° 4, 1960.
- [5] L. MICHAUD
Explosions nucléaires souterraines. Etude des rayons de cavité.
Rapport CEA n° 3594 - 1968.
- [6] G.H. HIGGINS - TR - BUTKOVICH
Effect of water content, yield, medium and depth of burst on cavity radii.
UCR L 50 203, February 1967.
- [7] C.R. BOARDMAN - D.D. RABB - R.D. ARTHUR
Responses of four Rock Medium to contained nuclear explosions.
Journal of Geophysical Research, Vol. 69, n° 16, Aug. 15, 1964.
- [8] C.R. BOARDMAN - G.L. MEYER - D.D. RABB
Macrodeformation resulting from the Handcar event.
UCR L 50 149, December 1, 1966.

- [9] P. PERROUD
 Problèmes de transfert de chaleur associés aux explosions nucléaires souterraines. Etude théorique.
 Rapport CEA - CENG - Sept. 1961.
- [10] P. PERROUD - R. BERANGER
 Communication privée
- [11] S. DERLICH
 Explosions nucléaires souterraines - Effets sur les ouvrages dans le granite -
 Rapport CEA en cours de publication.
- [12] F. DELORT
 Synthèse de données expérimentales sur les cratères par explosifs nucléaires.
 Communication privée. 1967.
- [13] F. DELORT
 Caractéristiques physiques des excavations réalisées par des tirs d'explosifs chimiques disposés en ligne. Synthèse des résultats américains.
 Communication privée. 1968.
- [14] F. DELORT - G. BURG
 Lois expérimentales sur les dimensions des tranchées creusées par les tirs en ligne.
 Rapport CEA - en préparation.
- [15] R.V. WHITMAN
 Soil mechanics considerations pertinent to predicting the immediate and eventual size of explosion craters.
 SC RR 4405, december 1959
- [16] W.C. SHERMAN - W.E. STROHM
 Engineering properties of explosions produced craters
 TID 7695 - april 1954
- [17] H. LARZILLIERE
 Communication privée.
- [18] F. DELORT
 Exploitations minières avec des explosions nucléaires souterraines.
 Revue de l'industrie minière, Vol. 49 - Oct. 1967 n° 10.
- [19] P. COHEN - M. DUPUIS - J.M. PICQ
 L'explosif nucléaire, atout potentiel pour l'industrie chimique.
 Energie Nucléaire, vol. 10, n° 3, mai 1968.

- [20] F. DELORT
 Applications des explosions souterraines aux exploitations pétrolières.
 Communication privée. 1967.
- [21] E. TELLER - W.K. TALLEY - G.H. HIGGINS - G.W. JOHNSON
 The constructive uses of Nuclear explosives
 Mc Graw - Hill Book Company 1968.
- [22] F. DELORT - M. CENTENE - H. LARZILLIERE
 Détermination statistique de relations expérimentales sur les dimensions des cratères creusés par explosions souterraines.
 Rapport CEA en cours de préparation.

Manuscrit reçu le 21 janvier 1969

FIN