

CEA - R - 3779  
PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

5.0  
**EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES  
ETUDE GEOLOGIQUE DES CAVITES**

*par*

*Jean FAURE*

SOUS - DIRECTION DES ESSAIS

Centre d'Etudes de Bruyères - le - Chatel

**Rapport CEA-R-3779**

**1969**

Ca

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A

CEA-R-3779 - FAURE Jean

EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES. ETUDE  
GEOLOGIQUE DES CAVITES

Sommaire. - L'étude géologique d'explosions nucléaires souterraines permet de déterminer les principaux caractères de la cavité créée. Sa partie inférieure est sphérique ; il en était vraisemblablement de même de sa voûte, effondrée dans la plupart des milieux à l'exception du sel gemme. Son rayon, à énergie d'engin égale, varie selon les roches du simple au double. La disposition de son contenu dépend des caractéristiques des produits solides et liquides au moment de la chute du toit ; selon le cas, il n'y a pas (tuf et alluvions) ou il y a (granite) mélange des éboulis et des laves. Dans tous les milieux, les propriétés physiques

---

CEA-R-3779 - FAURE Jean

UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS. GEOLOGICAL  
SURVEY OF THE CAVITIES

Summary. - A geological survey of underground nuclear explosions makes it possible to determine the main characteristics of the cavity formed. The lower portion is spherical ; the same was very likely true of the roof, which collapses in the majority of media with the exception of rock-salt. Its radius, for a given bomb size, can vary by a factor of two according to the type of rock. The lay-out of its contents depends on the characteristics of the solid and liquid products at the moment of the roof's collapse ; according to the medium involved, mixing of the rubble and the mud-flow occurs (granite) or does not occur (tuff and

./.

moyennes peuvent être évaluées.

1969

27 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

---

alluvia). In all media, the average physical properties can be evaluated.

1969

27 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

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

EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES  
ETUDE GEOLOGIQUE DES CAVITES

par

Jean FAURE

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

#### 1 - RAPPEL DES TECHNIQUES D'ETUDE

#### 2 - GEOMETRIE DE LA CAVITE

2.1 - Forme de la demi-cavité inférieure

2.2 - Forme de la partie supérieure de la cavité

2.3 - Dimension de la cavité

#### 3 - CONTENU DE LA CAVITE

3.1 - Classification des roches de la cavité

3.1.1 - Produits de fusion en masse

3.1.2 - Produits fondus de transition

3.1.3 - Eboulis

3.2 - Répartition du contenu de la cavité

3.4 - Propriétés physiques du contenu de la cavité

### CONCLUSION

### REFERENCES

## LISTE DES FIGURES

- 1 - Exemple de récupération pour des sondages ayant traversé la cavité.
  - 2 - Diagraphie d'un sondage passant près d'un point de tir .
  - 3 - Sortie de la cavité.
  - 4 - Photographies de laves et de granite fondu.
  - 5 - Schéma de cavités dans différents milieux.
  - 6 - Répartition du contenu de cavités dans le granite.
  - 7 - Position des roches fondues dans la cavité finale des expériences du Sahara.
-

# EXPLOSIONS NUCLEAIRES SOUTERRAINES

## ETUDE GEOLOGIQUE DES CAVITES

### INTRODUCTION

La description des différentes phases d'une explosion nucléaire souterraine [ 1 ] a montré comment le milieu se comporte sous l'effet de l'onde de choc. La vaporisation et la fusion de la roche près du point de tir créent une cavité que la détente des gaz produits contribue à développer à l'intérieur d'une zone de roche pulvérisée. Dans la plupart des milieux, une telle cavité n'est pas longtemps stable. Au bout d'un laps de temps variable, compris par exemple entre quelques minutes et quelques heures pour le granite, elle s'effondre et se remplit d'éboulis qui proviennent de son toit. Il y a au-dessus formation d'une cheminée. L'objet de cette étude géologique de la cavité est de dresser un inventaire des transformations subies par la roche de ce domaine.

Sauf dans certains cas particuliers, comme le sel gemme où la cavité est stable, il est difficile de pénétrer à proximité de la chambre de tir. Les matériaux sont totalement éboulés ; il y règne une température et une radioactivité élevées. L'analyse doit être conduite au moyen de forages [ 2 ]. Le premier travail consiste à observer, décrire et classer les échantillons récupérés dans le carottier de sondage. Dans un second temps, la comparaison des carottes d'abord, des forages ensuite, permet de reconstituer l'allure globale des phénomènes observés. Enfin ces données sont interprétées et comparées avec les mesures expérimentales et les lois théoriques de l'explosion.

L'étude géologique conduit ainsi à dresser une image de la cavité. La forme sphérique est maintenant reconnue par examen direct pour sa partie inférieure. Ses dimensions sont fonction des paramètres qui régissent l'explosion et le milieu. Son contenu, roches fondues et éboulis, peut être inventorié en détail ; la répartition des différents types de roches et leurs propriétés physiques sont définies dans leurs grandes lignes. Les développements qui suivent, reprennent ces différents points en les illustrant par des exemples tirés de l'expérience acquise sur le champ de tir saharien [ 3 ] [ 4 ] et comparés aux données des expérimentateurs américains [ 5 ] [ 6 ].

### 1 - RAPPEL DES TECHNIQUES D'ETUDE

La reconstitution de la forme et du contenu de la cavité se fonde sur l'interprétation des observations réalisées sur les carottes récupérées en sondage. Les problèmes que posent de telles études ont été déjà traités dans leur généralité [ 2 ]. Il peut être néanmoins utile de rappeler ici les principaux points qui caractérisent l'étude des cavités.

La cavité a été explorée, à peu de chose près, en tous sens, à tous les niveaux,

et dans toutes les directions. Certes, une cavité donnée a rarement été étudiée par plus de cinq à six sondages. L'utilisation de l'analyse dimensionnelle qui permet de mettre en évidence les similitudes dans les explosions nucléaires souterraines [ 7 ] autorise cependant une généralisation des faits observés. Cette technique simplifie la comparaison des résultats de plusieurs tirs ; lorsqu'ils ont eu lieu dans le même milieu, l'opération est particulièrement aisée. Elle présente de plus l'avantage de faciliter l'élimination des singularités en ne retenant que les caractères vraiment généraux. C'est ainsi que peut être réalisée la synthèse des observations sur la cavité.

Les schémas d'ensemble établis dans le cas du champ de tir saharien en donnent un exemple. La position relative des sondages par rapport au point de tir y est reportée en coordonnées réduites ( $r$  distance réduite est égal à  $R W^{-1/3}$ ) de façon à comparer les effets d'explosions d'énergie  $W$  différente. Comme les forages visent dans la majorité des cas un point situé à l'aplomb du centre de l'explosion le dessin reproduit seulement les projections des sondages dans le plan vertical qui contient le point de tir. Ce procédé n'est donc pas entièrement rigoureux : la représentation de droites de l'espace dans un seul plan, celui de la figure n'est pas possible ; elle ne tient pas compte des écarts généralement minimes dans le plan horizontal. Les figures 1 et 6 sont construites d'après ces normes.

Figure 1

Exemple de récupération pour des sondages ayant traversé la cavité

Taux de récupération

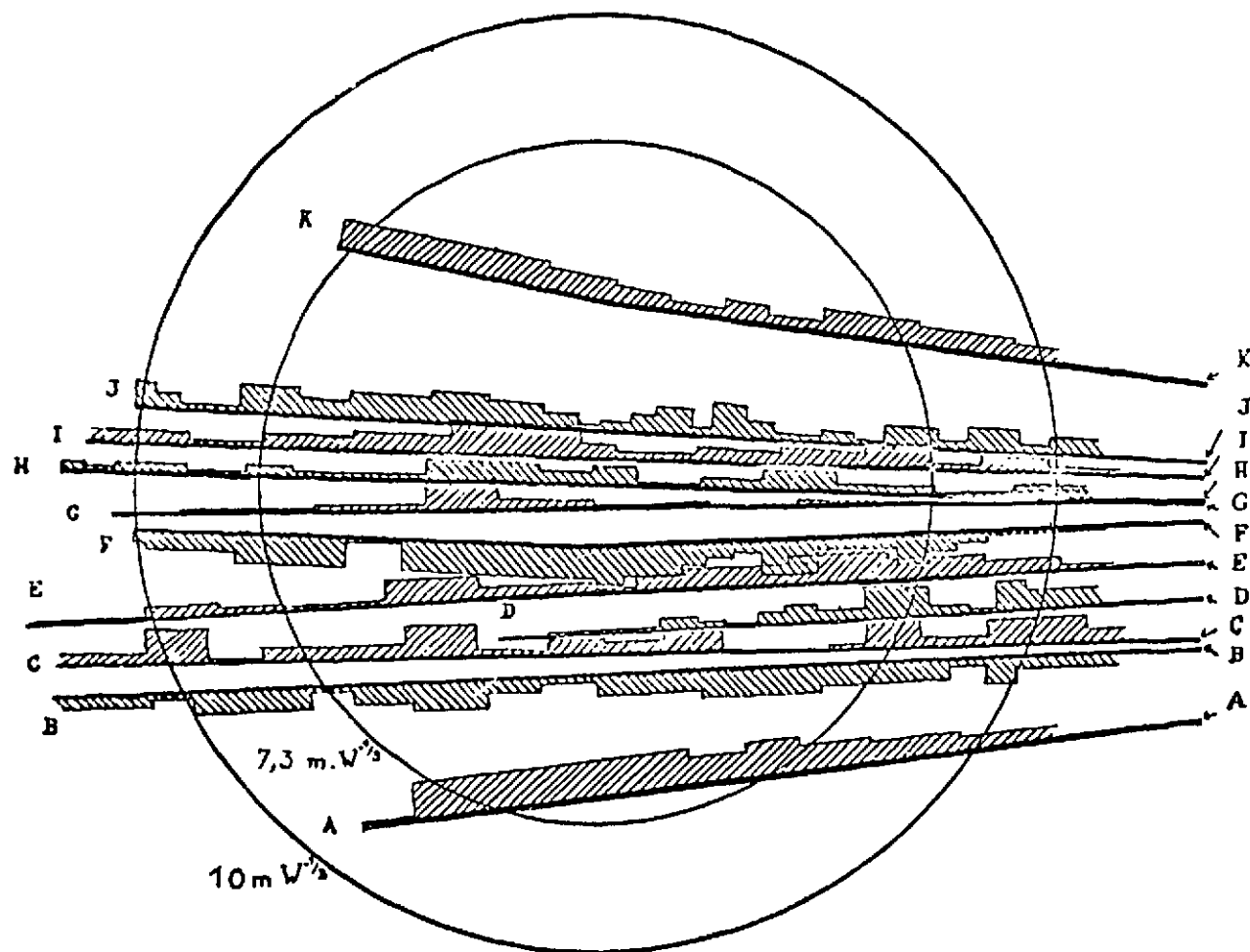
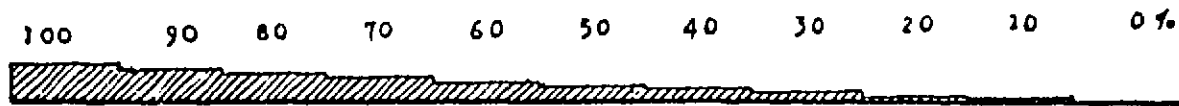
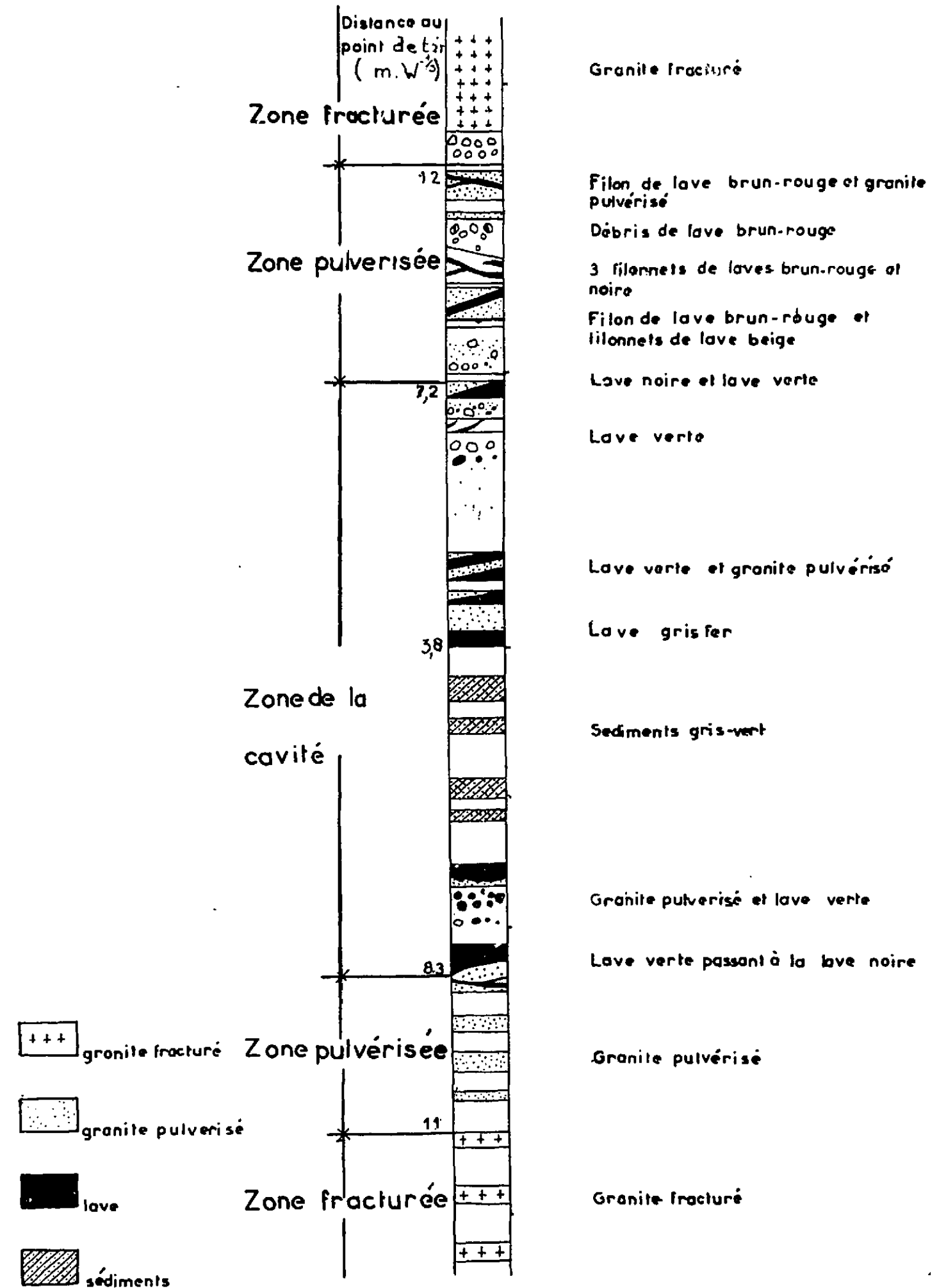


Figure 2

Diagraphie d'un sondage passant près d'un point de tir





La valeur de l'étude des carottes de forage repose sur deux points : il faut une récupération représentative de tous les produits de la cavité et il faut aussi pouvoir assigner à chaque échantillon une cote précise. Ces conditions sont remplies avec une bonne approximation dans la majorité des cas.

La figure 1 montre, pour le champ de tir saharien, la récupération d'un certain nombre de forages réalisés par procédé rotary [ 2 ]. Ses variations paraissent très importantes mais sont rapportées à des causes techniques liées à la méthode de prélèvement. L'angle du forage sur l'horizontale a par exemple une influence indéniable. Dans un matériau sans cohésion, la récupération des forages inclinés vers le bas (A, B, C) est souvent médiocre car le carottier a tendance à se vider lors des manoeuvres de retrait. Inversement les forages ascendants (K) donnent d'excellents résultats. Le diamètre du forage joue aussi : les petits diamètres, 46 mm ou 56 mm (forages G ou D) sont moins favorables que les plus grands, 66 mm ou 76 mm. Le défaut de récupération a donc ici une cause purement technique. Les passées absentes ne correspondent ni à des vides, ni à des roches d'un type particulier. Les carottes peuvent être tenues vraisemblablement pour représentatives des parties manquantes.

L'absence fréquente de mesures de déviation du forage et d'une récupération totale pose le problème du repérage de la position exacte des échantillons. Dans la zone proche du point de tir, les mesures de déviation ne sont pas généralement réalisables à cause de la température et de la radioactivité ambiante. [ Les sondages F et K sont, à ce titre, des cas particuliers ] . La direction du forage n'est pas contrôlée dans un domaine où l'hétérogénéité du milieu crée des risques certains d'écart par rapport au parcours présumé. A ceci s'ajoute l'erreur de cote due à l'absence de prélèvements qui peut être de l'ordre de la longueur du carottier soit 1,5 m au maximum. Quelques grosses aberrations peuvent ainsi être expliquées sur le champ de tir saharien. Mais de tels faits sont rares. La cohérence des résultats laisse à penser que les erreurs de position sont faibles. Les cotes le long du forage sont déterminées avec une précision suffisante pour établir avec une bonne approximation la distance au point d'explosion des carottes.

Ainsi, pour les forages par procédé rotary, l'analyse critique des produits récupérés tend à prouver que l'échantillonnage est représentatif des matériaux de la cavité. L'incertitude sur les cotes est le plus souvent inférieure au mètre. Ces résultats peuvent être généralisés à l'ensemble des études de forages près des points de tir.

## 2 - GEOMETRIE DE LA CAVITE

Il s'agit à partir des forages de reconstituer la forme et les dimensions de la cavité (voir figure 2 un diagramme de sondage). Le problème revient à déterminer une limite sur les carottes extraites. Malgré quelques incertitudes, sa solution est possible dans tous les cas pour la demi-cavité inférieure. En revanche, le toit de la cavité ne peut être étudié que s'il n'y a pas eu formation d'une cheminée ; dans l'hypothèse contraire, l'examen des forages conduit à définir la zone de transition entre les deux structures. Quand la forme est connue, l'analyse des dimensions permet de passer à l'étude quantitative des effets des explosions

### 2.1 - Forme de la demi-cavité inférieure

La détermination de la demi-cavité inférieure ne doit pas présenter d'ambiguïté. La limite de cette structure est caractérisée par la présence des produits de fusion de la roche. Leur apparition dans les carottes récupérées marque donc l'entrée dans cette zone.

En pratique la limite est assez facilement repérée d'après la place relative des roches pulvérisées et fondues. L'augmentation rapide de la radioactivité dans le forage est un signe complémentaire. Les expérimentateurs américains, qui font souvent état d'une interface nette, se sont également fondés sur l'élévation de la température [ 5 ]. Dans le granite du champ de tir saharien, il existe parfois des passées de laves insinuées dans les fractures du milieu. Mais ces produits vitrifiés se distinguent souvent par leur nature, leur couleur et leurs rapports avec l'encaissant. Lorsque les récupérations sont suffisantes il y a très rarement doute sur la limite. La zone de transition entre le domaine de granite pulvérisé et la cavité

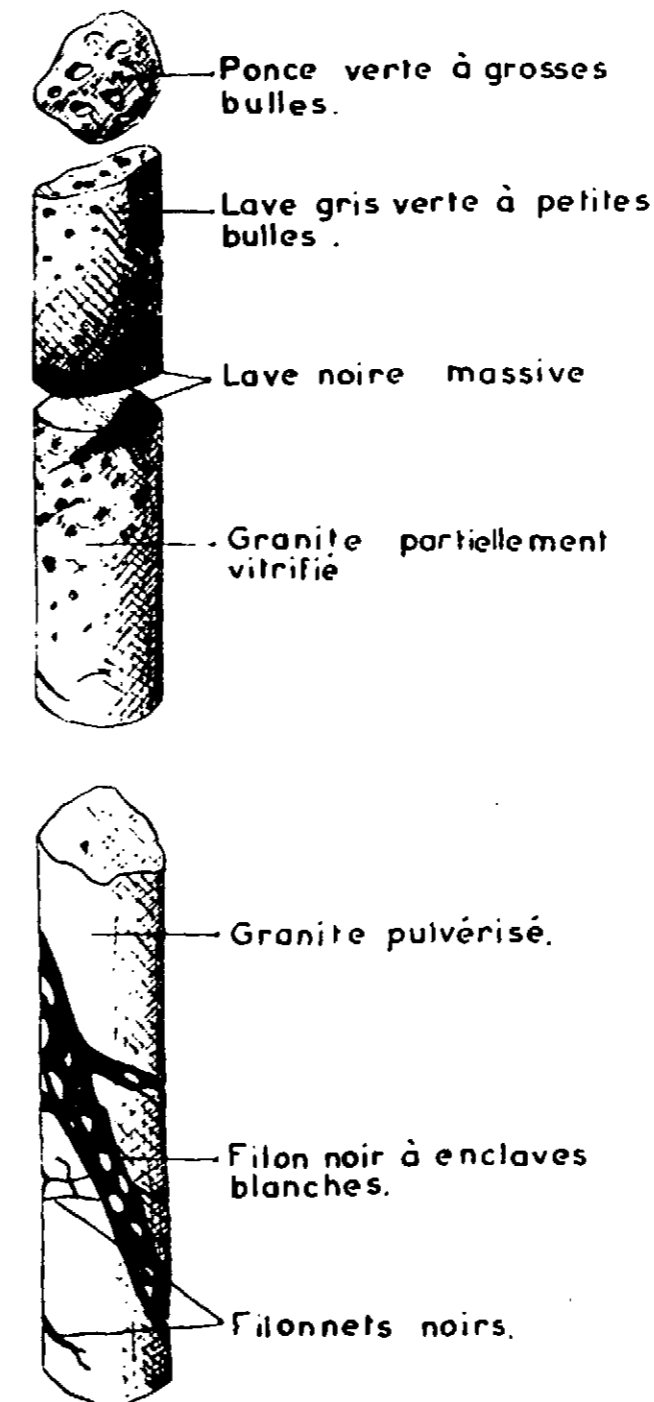
atteint alors une trentaine de centimètres (voir figure 3, la sortie de la cavité). L'erreur ainsi commise est négligeable devant celle qui résulte des incertitudes sur la position exacte des échantillons. A cette précision (10 %) la forme de la demi-cavité inférieure est celle d'une demi-sphère centrée sur le point de tir.

Cette image simple peut cependant être légèrement nuancée dans ses détails.

Ainsi, pour les expériences du champ de tir saharien, le centre de la demi-sphère déterminé expérimentalement ne coïncide pas exactement dans le plan horizontal avec celui de l'explosion. En effet, les forages qui traversent de part en part la cavité à ce niveau donnent des cotes de sortie par rapport au point de tir qui diffèrent des cotes d'entrée. Dans la grande majorité des cas (80 % environ) cet écart est inférieur à 10 % de la valeur moyenne retenue pour le rayon. Ceci laisse néanmoins supposer une excentricité possible de la structure. Des résultats analogues ont été observés lors des mesures de pression de l'onde de choc [ 8 ], de température résiduelle [ 9 ] ou de zone fracturée étudiée par procédé sismique [ 10 ]. Pour le moment, on ne peut pas établir un lien avec les différences relevées sur forage.

Dans le plan vertical aussi, les résultats expérimentaux ne concordent pas exactement avec la forme d'une demi-sphère. Le rayon vertical au-dessous du point de tir paraît légèrement plus court que le rayon horizontal. Ce fait est probable pour le champ de tir saharien mais les sondages réalisés abordent

Figure 3  
Sortie de la cavité



ECHELLE: 0 10 cm

tangentielle la base de la cavité (voir par exemple sondage A figure 1) et la précision des cotes s'en ressent. L'écart relevé est de l'ordre des erreurs expérimentales de mesure (10 %). Les expérimentateurs américains ont aussi constaté que, dans plusieurs cas, les rayons de cavité mesurés dans le plan horizontal sont de 10 % supérieurs à ceux déduits des forages verticaux [ 5 ].

## 2.2 - Forme de la partie supérieure de la cavité

Dans la plupart des terrains la formation d'une cheminée entraîne la disparition de la demi-cavité supérieure. Il ne s'avère pas possible de rétablir sa forme à partir d'un examen des éboulis récupérés en sondage. Les prélèvements sont trop peu nombreux, et de toute façon, les blocs du toit ont été partiellement transformés au contact des produits fondus de la cavité.

La configuration de la demi-cavité supérieure n'est donc connue que dans les milieux où elle est stable. C'est, en pratique, le cas du sel gemme. Les expérimentateurs américains ont publié les résultats de deux tirs dans ce matériau. Le premier est GNOME [ 5 ] ; la cavité, dans laquelle il a été possible d'entrer, présente un éboulement partiel de la voûte dont le profil initial a disparu. Le second, SALMON [ 11 ] a une cavité finale sphérique.

Dans tous les autres cas, les forages horizontaux juste au-dessus du point d'explosion, permettent de définir le raccordement de la cavité avec la cheminée, structure étudiée dans un autre rapport [ 12 ]. Il s'agit soit d'un cylindre soit d'un tronç de cône - un entonnoir - faiblement évasé vers le haut. La base s'appuie sur la section circulaire de la sphère au niveau du point de tir [ 4 ].

## 2.3 - Dimension de la cavité

L'examen de la forme de la cavité montre qu'en première analyse, elle est sphérique et donc définie par son rayon  $R_c$ . Sa connaissance est essentielle. Il caractérise le comportement du milieu sous l'effet de l'explosion. Le rayon a été de ce fait particulièrement étudié [ 13 ] [ 14 ]. Des relations expérimentales apparaissent avec d'autres données des explosions [ 15 ] [ 16 ].

En considérant la question sous l'angle théorique, le rayon de cavité est déterminé par deux catégories de paramètres. La première correspond aux conditions de l'expérience et regroupe des grandeurs qui caractérisent l'engin, comme son énergie  $W$ . Le second ensemble réunit les facteurs qui dépendent des propriétés de la roche dans le domaine concerné ; ce sont par exemple la densité  $\rho$ , la hauteur de couverture  $H$  ou la pression lithostatique  $P_l$  qui est considérée dans la plupart des cas comme une fonction des deux grandeurs précédentes. L'analyse théorique des phénomènes cherche à rendre compte le mieux possible de l'action de ces différents facteurs.

Sur le plan expérimental, le rôle que jouent les paramètres de la roche, justifie l'étude du milieu géologique avant tir. Après l'explosion, l'examen des forages permet d'établir des relations purement empiriques caractéristiques des champs de tirs.

Pour le granite des expériences sahariennes [ 3 ] [ 4 ]

$$R_c = 7,3 W^{1/3} \pm 10 \% \quad (m ; kt).$$

Pour les milieux des expériences américaines [ 5 ]

$$R_{ca} = C W^{1/3} [ \rho H ]^{-1/4} \pm 7 \% \quad (m ; kt).$$

$C$  représente une constante expérimentale caractéristique du milieu du tir. Sa valeur moyenne est d'environ 70 ; elle vaut 78,1 dans le tuf, 65,9 dans les alluvions, 63,6 dans le sel gemme et 60,6 dans le granite [ 5 ]. Le tir Handcar, dans la dolomie, correspond à une valeur de  $C$  de 51 [ 17 ].

Ces relations font ressortir un point essentiel. Pour une énergie  $W$  donnée et des hauteurs de couverture du même ordre de grandeur, par exemple 200 m, le rayon  $R_{ca}$  est égal à 1,73  $R_c$  ; le volume des cavités créées est dans ce cas environ cinq fois plus grand dans les granites des champs de tir du Nevada que dans celui des expériences sahariennes. Dans ce dernier granite une explosion d'une énergie de 1 kt forme dans la roche une cavité de l'ordre de 1600 m<sup>3</sup>. Ce point précis, et d'une façon plus générale, les problèmes que soulève l'existence de deux relations expérimentales, ont déjà été abordés [ 13 ].

Des formules plus élaborées ont été mises au point pour relier ces résultats aux paramètres des explosions. Ainsi les données des champs de tir américains sont correctement décrites à partir d'une relation qui fait intervenir, outre les facteurs des formules empiriques, la pression de vaporisation du matériau et le coefficient adiabatique d'expansion des gaz formés [ 14 ]. Une relation encore plus générale permet une synthèse de tous les résultats connus d'explosions nucléaires souterraines dont celles du Sahara [ 13 ] :

$$R_c = \left[ P_g^{1/3\gamma} r_v \alpha^{1/3} \right] \frac{W^{1/3}}{\left[ \rho g H + C_s \right]^{1/3\gamma}}$$

$R_c$	rayon de cavité
$P_g$	pression des gaz dans la cavité
$\gamma$	coefficient adiabatique d'expansion des matériaux du domaine vaporisé
$r_v$	rayon de la zone vaporisée par une explosion d'une énergie de 1 kt dans le milieu
$\alpha$	facteur correctif qui tient compte de la géométrie de la chambre de tir
$W$	énergie de l'engin
$\rho$	densité de la roche
$g$	accélération de la pesanteur
$H$	hauteur de couverture
$C_s$	coefficient de structure du milieu défini dans la référence [ 13 ]

Le terme  $\left[ P_g^{1/3\gamma} r_v \alpha^{1/3} \right]$  caractérise le comportement du milieu vis à vis de l'onde de choc nucléaire. En le prenant dans une première approximation égal à 52, la relation (m, kt, t.m<sup>-3</sup>, m, bar) devient représentative de tous les tirs connus dans des milieux très divers avec une dispersion inférieure à 15 %.

$C_s$  varie de 5 bars dans le tuf à 200 bars dans le granite du champ de tir saharien. Les études géologiques confirment que, pour ce dernier massif, le produit  $\rho g H$  seul n'est pas représentatif de la pression qui règne dans la roche [ 4 ].

L'étude du rayon de cavité peut aussi conduire à l'établissement de relations expérimentales intéressantes.

Ainsi l'injection d'air dans la cheminée du tir Shoal a permis de mesurer le volume de vide qu'elle comportait [ 15 ]. Celui-ci correspond à une sphère dont le rayon est voisin de celui qui a été déterminé pour la demi-cavité inférieure. Cette méthode constitue donc un moyen de mesurer la valeur du rayon  $R_c$ . Le résultat éclaire aussi le

mécanisme de formation de la cheminée. Il est compatible avec l'hypothèse d'une cavité sphérique centrée au point d'explosion avant son effondrement.

Au cours des expériences effectuées au Sahara, il est apparu une liaison entre le rayon  $R_c$  et des résultats géophysiques concernant le temps de chute de la cavité [ 16 ]. L'éboulement de son toit a été enregistré par des stations sismiques ; par ce moyen on mesure le temps  $t$  écoulé entre l'instant de l'explosion et l'effondrement de la voûte. L'analyse des résultats montre alors qu'une loi expérimentale linéaire relie  $t$  à  $R_c$ .

$$R_c = 0,8 t + 3 \quad (\text{m, mn})$$

Cette relation permet de se faire une idée de la phénoménologie exacte de la phase quasi-statique durant laquelle la cavité sphérique se maintient dans le milieu et des facteurs qui régissent la chute de son toit. Sans entrer ici dans les détails, la formule précédente peut exprimer que la durée des fuites, ou thermiques, ou gazeuses, à travers la paroi de la cavité, est proportionnelle à sa masse soit donc au volume ou encore à  $R_c^3$  et inversement proportionnelle à sa surface et donc à  $R_c^{-2}$ .

### 3 - CONTENU DE LA CAVITE

L'étude de l'intérieur de la cavité comporte la description des produits qu'elle contient et l'analyse de leur répartition et de leurs propriétés physiques. Elle reflète les particularités de chaque milieu. En effet, devant l'intensité de l'onde de choc, les différents matériaux solides réagissent qualitativement de façon assez uniforme [ 18 ] : à la dimension près, la géométrie de la cavité est la même. Son évolution au cours du temps dépend par la suite beaucoup plus étroitement des caractéristiques propres de chaque roche. S'il n'y a pas effondrement de la voûte - c'est le cas du sel gemme -, le bain fondu se condense lentement à la base de la cavité. S'il y a chute du toit, le mélange des éboulis formés avec les produits de fusion obéit à des règles qui dépendent de facteurs comme la densité, la viscosité du bain ou la durée de l'effondrement. Ainsi, dans le tuf ou les alluvions, la densité faible des produits solides et la destruction rapide de la cavité empêchent, selon toute vraisemblance, le mélange avec les laves. Ce n'est pas le cas dans le granite où des éboulis tombent au fond du bain, et relèvent le niveau atteint par la phase liquide à une hauteur qui est fonction de la taille de la cavité et de la quantité des éboulis. Ces différents résultats sont apparus à la suite de la comparaison des données. Il s'agit d'une reconstitution de la phénoménologie qui vient en conclusion de l'étude géologique. Cependant, elle peut servir de fil directeur logique pour décrire la classification, la répartition et les propriétés physiques du contenu de la cavité.

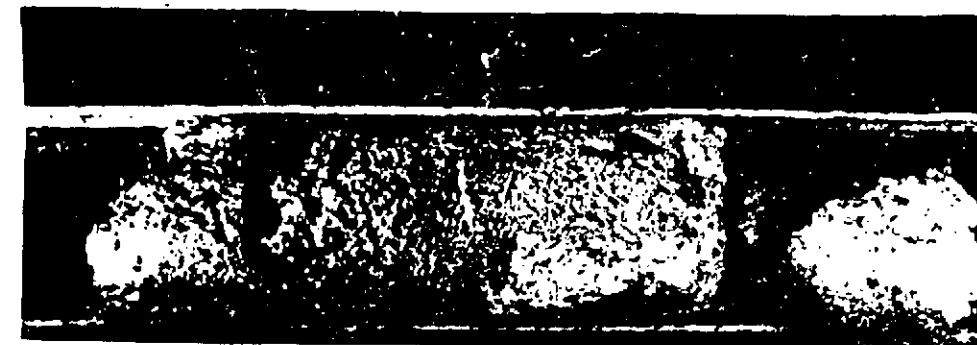
#### 3.1 - Classification des roches de la cavité

Lors de l'examen des carottes de forage, l'entrée dans la cavité se traduit par l'apparition en abondance de produits vitrifiés ; ces échantillons totalement fondus - ou laves par analogie avec les roches volcaniques - caractérisent ce domaine. Il existe cependant, à côté de celles-ci, tous les intermédiaires avec la roche intacte ; les blocs tombés de la voûte, déjà transformés à des degrés divers par l'onde de choc, ont subi des amorces de fusion au contact de la roche directement liquéfiée par l'explosion. En l'absence de solution de continuité entre les blocs fondus par le choc ou vitrifiés au contact du bain et les éboulis, la description définit les types les plus caractéristiques.

Dans la cavité il y a lieu de considérer deux types de produits de fusion dont

Figure 4

### PHOTOGRAPHIES DE LAVES ET DE GRANITE FONDU



Laves claires à nombreuses bulles, en contact avec des éboulis



Laves sombres



Granite partiellement fondu

l'importance est très inégale selon les milieux. Le premier provient d'une liquéfaction en masse de la roche et le second forme transition avec la roche non fondue. Les caractères de détail de cette classification valable partout, ne sont pas identiques pour les expériences du champ de tir saharien [ 4 ] et pour celles du Nevada [ 19 ] ; la présence ou l'absence de bulles, la distribution de la radioactivité ne se correspondent pas exactement. Cela est vraisemblablement lié aux divergences dans l'évolution de la zone proche. L'étude détaillée de ces types de fusion, qui ne se limitent pas totalement à la cavité, doit faire l'objet d'un rapport distinct [ 20 ]. De même les éboulis comprennent des échantillons dont les diverses modifications d'ordre mécanique, ont été envisagées par ailleurs [ 12 ]. C'est pourquoi, ici, seuls seront donnés les principaux caractères de ces trois types de roches.

### 3.1.1 - Produits de fusion en masse

Ce sont en général des laves sombres, souvent denses et très radioactives qui représentent le mélange des roches directement fondues par le choc. Dans la classification américaine [ 19 ], les bulles ne sont pas signalées dans ce type de laves ; en revanche, elles sont fréquentes dans les carottes des expériences sahariennes qui lui correspondent.

Dans ce dernier cas, il s'agit de roches classées sous le nom de laves gris-vert ; le caractère le plus typique est, en effet, leur couleur. Sur l'échantillon massif, elle varie à l'oeil nu d'un vert sale moyen ou foncé à un gris fer sombre. Ces changements de teintes ne paraissent pas liés à la composition intime de la carotte ; réduite en poudre, elle donne dans tous les cas un sable gris-vert foncé. A la loupe binoculaire, la couleur observée reste sombre. Les nuances dépendent vraisemblablement du faciès de la lave. Le type moyen correspond à une roche massive à cassure en esquille. Les bulles y sont espacées et généralement petites. Par exagération de leur nombre, la lave évolue vers une ponce grisâtre, voire vers un type d'écume formée de filaments consolidés. Inversement, dans les cavités les plus grandes, les forages récupèrent des carottes d'un verre obsidienne.

Les expériences dans le sel gemme ont donné une phase vitrifiée comportant environ 10 % de vides sous forme de bulles [ 11 ].

Les analyses de laboratoire confirment l'homogénéité de détail de tous ces produits tout en précisant certains caractères particuliers.

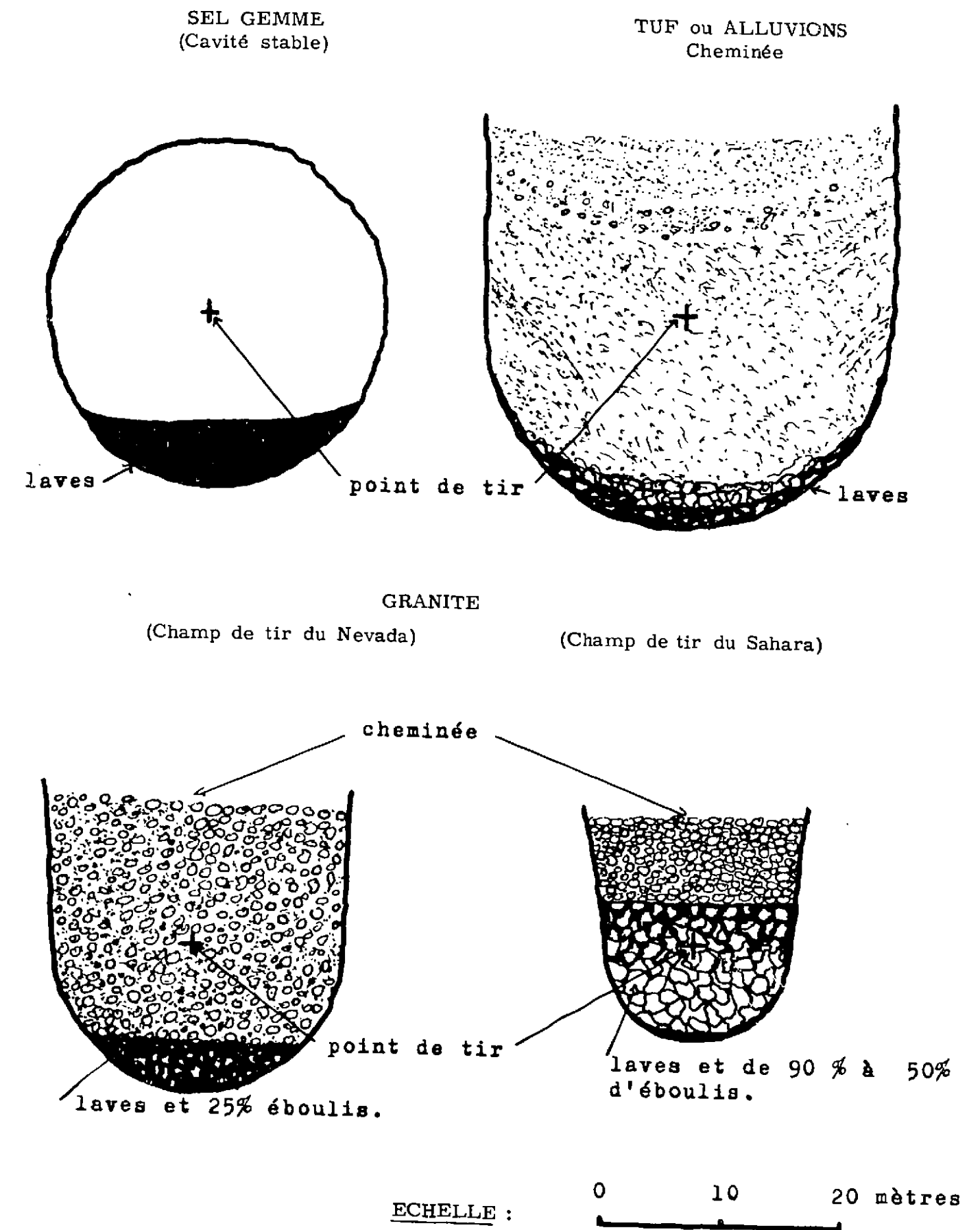
Ainsi, pour le champ de tir saharien, la répartition homogène des oxydes de fer dans la phase vitreuse paraît être un caractère distinctif de ce type. Les analyses chimiques montrent une certaine différenciation entre les laves du coeur de la cavité, identiques au granite initial, et celles de la bordure, plus pauvres en calcium.

Une évolution comparable, et beaucoup plus nette, a été mise en évidence pour le tir Salmon dans le sel gemme [ 6 ]. Il y a dans le bain fondu une cristallisation fractionnée des différents chlorures et sulfates.

### 3.1.2 - Produits fondus de transition

Il existe, principalement dans les zones de contact avec la roche qui n'a pas fondu, des passées vitrifiées qui forment transition avec les produits de fusion en masse. Elles correspondent au second type de la classification américaine [ 19 ] ; celui-ci est constitué par des verres légèrement colorés, présentant plus ou moins de bulles, peu radioactifs ; ils se développent surtout par fusion à haute température de blocs incorporés au bain fondu.

Figure 5  
Schéma de cavités dans différents milieux  
Explosions d'une énergie de 1 kt sous 200 m de terrain



Ces produits ont d'abord été observés pour les expériences dans le tuf mais sont surtout fréquents pour les explosions dans le granite. Ils se retrouvent sur le champ de tir du Sahara avec quelques traits particuliers. Il s'agit là de laves radioactives à couleur noire ou fumée ; à la différence des laves gris vert décrites plus haut, leur teinte sur de petits éléments apparaît comme beaucoup plus claire. A la loupe binoculaire, l'examen révèle une couleur jaune miel à bronze. Dans ce dernier cas, ces laves ne présentent généralement pas de bulles sauf dans les zones de passage aux laves gris vert. Les inclusions blanchâtres y sont très fréquentes et donnent à la carotte un faciès caractéristique "l'aspect saumoné".

L'étude au laboratoire montre une certaine hétérogénéité dans ces produits de fusion récupérés au Sahara. En particulier, les oxydes métalliques y forment des traînées irrégulièrement réparties dans la phase vitreuse. Il y a, selon toute vraisemblance, l'origine des variations de couleurs entre les laves. Les inclusions blanches semblent constituées principalement de morceaux de cristaux de quartz : la fusion du granite est un phénomène progressif ; durant la fusion pâteuse, une phase solide peut coexister avec le bain fondu. Ceci se retrouve d'ailleurs lors de l'étude des éboulis.

### 3.1.3 - Eboulis

Les carottes des sondages qui passent dans la cavité récupèrent de nombreux morceaux de roches éboulés de son toit lors de la formation de la cheminée, leurs dimensions sont très variables ; la granulométrie des éboulis dépend, en effet, largement du milieu et des caractéristiques de l'explosion.

Ainsi, dans le tuf, la taille des éboulis est petite, de l'ordre du décimètre ; dans le sel gemme, elle est légèrement plus grande. Dans le granite du Sahara, la majorité des carottes de passées d'éboulis sont constituées de morceaux dont la longueur est de quelques décimètres. Cependant des échantillons de l'ordre du mètre ne sont pas rares. Dans les cavités les plus grandes, certains blocs atteignent même trois ou quatre mètres : la granulométrie des éboulis dans la cavité présente donc d'importantes variations. La différence avec les produits récupérés dans les niveaux supérieurs de la cheminée [ 4 ] [ 12 ] toujours de petites tailles, est nette.

Ces éboulis sont constitués par des roches qui ont déjà subi, à des degrés divers, l'action de l'onde de choc, il y a aussi bien des morceaux apparemment intacts que des éléments totalement pulvérisés. Il s'y ajoute les transformations causées par le contact d'un bain fondu à température élevée. Les deux séries de modifications, d'ordre mécanique ou thermique, se superposent et se masquent les unes les autres.

Ainsi, le premier effet de la température est de blanchir le granite du champ de tir saharien, ce qui le rend de couleur identique à celle du produit pulvérisé. Les oxydes de fer qui coloraient la roche en rose s'intègrent aux réseaux cristallins. Par contraste les micas noirs [ biotites ] apparaissent de plus en plus sombres. Peu à peu, dans certaines zones, les limites entre les cristaux, observées à l'oeil nu, deviennent floues ; la teinte générale vire au gris bleu puis au noir fumé ; les micas disparaissent. Il ne subsiste plus que des points blanchâtres sur un fond gris très sombre, le "faciès saumoné" déjà décrit.

## 3.2 - Répartition du contenu de la cavité

### 3.2.1 - Etude générale

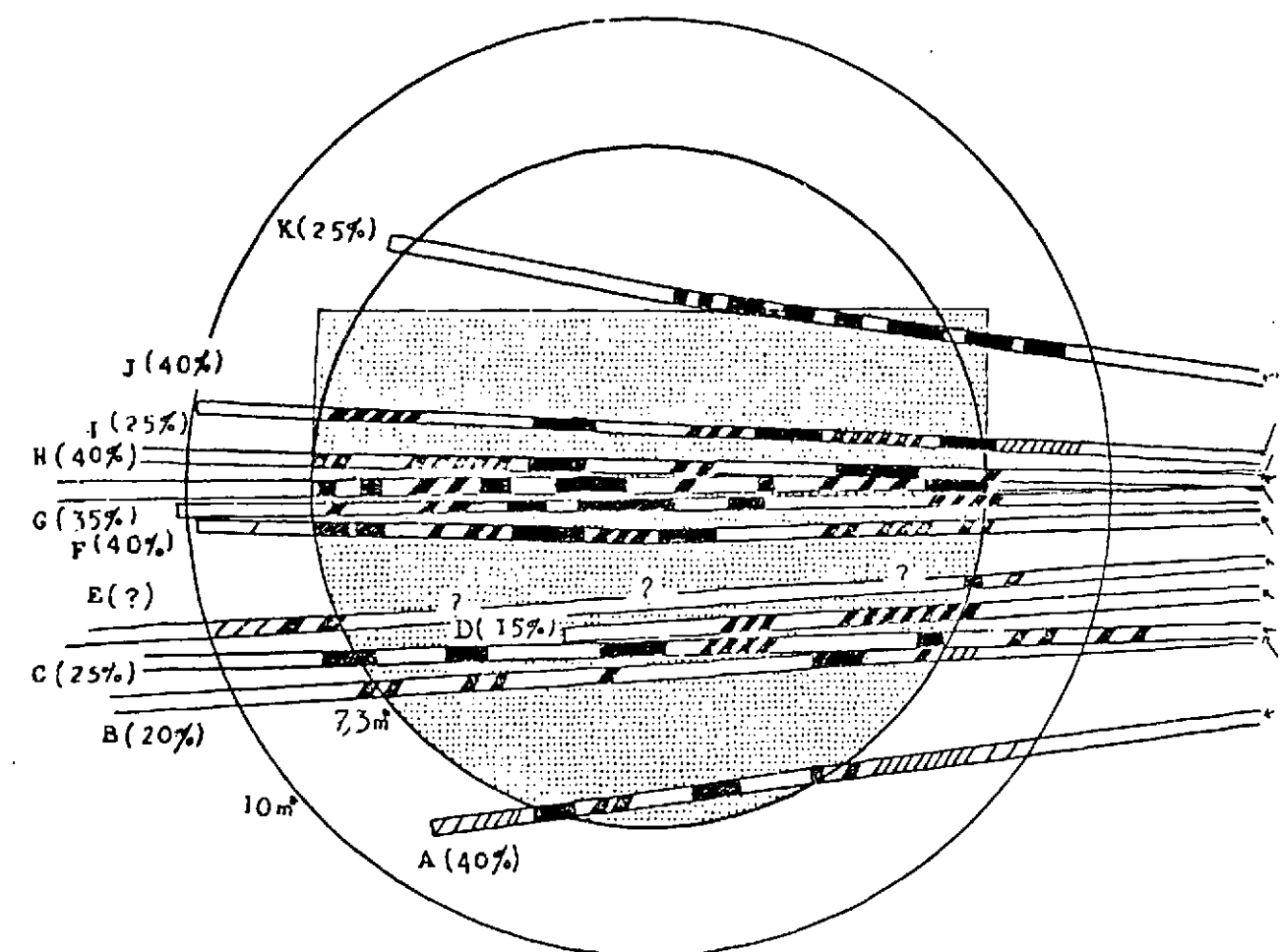
Les produits de fusion et les éboulis se répartissent différemment dans la cavité selon la manière dont évolue sa voûte et selon la façon dont le mélange s'effectue

Figure 6  
Répartition du contenu de cavités dans le granite

Position et pourcentage de roches fondues pour des forages ayant traversé la cavité

Roches fondues :

■ massives    ▨ en filons    ▩ en filonnets.  
domaine des laves.



Des raisons de sécurité ont empêché l'étude complète du sondage E qui paraissait contenir un fort pourcentage de roches fondues

entre les éboulis et le bain de roches fondues.

Le premier cas à envisager est celui où la cavité est stable. Le liquide se rassemble à la base de la cavité et s'y fige lentement. Il n'y a pas ou il y a très peu d'éboulis qui se fondent dans le bain. Le contenu de la cavité est donc constitué presque uniquement par des produits de fusion primaire sous l'effet direct du choc. Ils présentent une cristallisation fractionnée et ont peu de bulles car le dégazage a pu se faire lentement. L'exemple en est donné par une expérience réalisée aux Etats-Unis dans le sel gemme : le tir Salmon [ 11 ] a vaporisé ou fondu 5 400 tonnes de sel pour une énergie de 5,3 kt ; celles-ci ont formé un bain dont la solidification, estimée d'après l'évolution des gaz radioactifs isolés dans des bulles, a dû intervenir au bout d'environ un mois.

Tous les autres cas correspondent à l'ensemble des expériences aussi bien des champs de tir américains que de celui du Sahara. La cavité s'est effondrée et a été remplie par des éboulis. Un facteur essentiel entre alors en ligne de compte. Il s'agit des densités relatives des produits solides et liquides. Pour que le mélange des éboulis s'effectue avec les laves, il faut que leur poids spécifique soit plus grand ; dans l'hypothèse contraire, ils flotteront. Des blocs isolés ne peuvent être ainsi incorporés au bain. Lorsque la totalité de la cheminée est formée, une colonne d'éboulis appuie sur les laves et tend à y enfoncer sa base. Un second facteur entre alors en jeu : la viscosité de la phase liquide doit être suffisamment faible pour que l'incorporation de nouveaux produits dans le bain soit possible. Selon que le mélange se réalise ou non, il y a donc en théorie deux solutions.

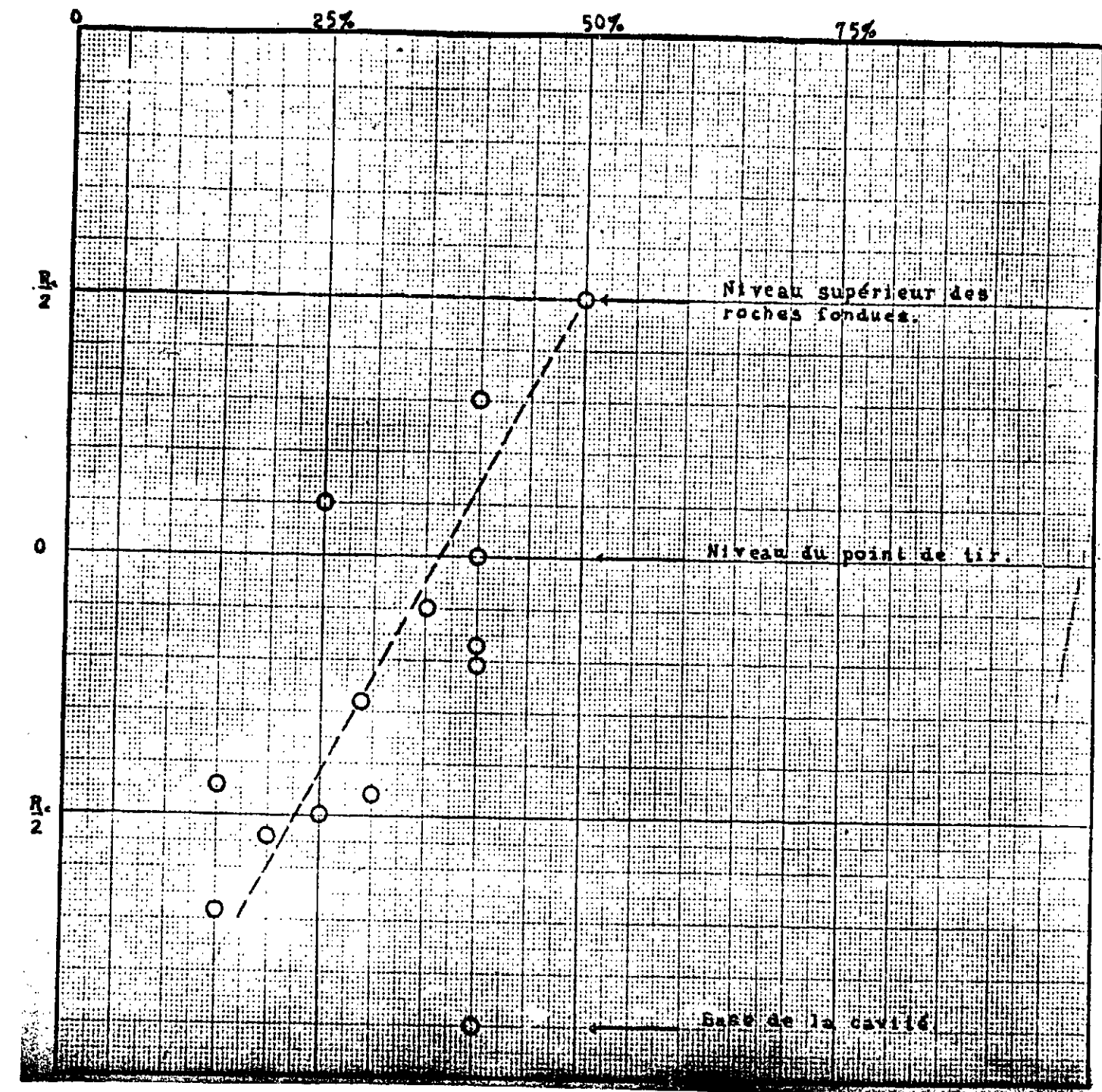
La première hypothèse suppose un poids spécifique de la roche solide inférieur à celui du liquide. C'est le cas du tuf et des alluvions pour lesquels  $\rho$  varie de 1,6 à 2 alors que le liquide formé, un bain de silicates a une densité de 2,2 à 2,3. Les éboulis surnagent. Ceci limite les surfaces de contact et les phénomènes de fusion secondaires sont rares. Les produits fondus se présentent grossièrement sous forme d'une couche moulant la demi-cavité inférieure. Il apparaît donc que les laves et les débris correspondant à la voûte disparue n'ont pas pu entièrement se rassembler à la base de la cavité. Ce fait suggère une chute très rapide de la voûte, dans les premiers instants qui suivent l'explosion ; effectivement, dans la grande majorité des cas, l'effondrement de la cavité n'a pas été enregistré de façon distincte par les stations sismiques pour les expériences dans le tuf ou les alluvions [ 21 ]. Si cela était confirmé, cette chute rapide pourrait expliquer certains traits particuliers de la classification américaine des laves : les gaz n'auraient pas le temps de se dégager ni la radioactivité de se répandre de façon homogène. Il y aurait là l'explication de la rareté des bulles et de l'existence de verres non radioactifs. La quantité de produits fondus dans ces milieux est assez faible : elle est estimée à environ 700 tonnes pour le tir Rainier d'une énergie de 1,7 kt [ 22 ].

Le second cas correspond aux explosions dans un massif de granite. Cette roche a un poids spécifique supérieur à celui du liquide soit 2,65 environ contre 2,2 à 2,3. De plus, la chute de la voûte de la cavité qui est progressive a lieu au bout d'un certain temps variant de quelques minutes à quelques heures. Aussi les roches liquéfiées par l'onde de choc ont-elles la possibilité de se rassembler à la base de la cavité et d'assimiler une partie des blocs qui tombent de son toit. Au moment du paroxysme de l'effondrement il y a ébullition puis solidification brutale ; les faciès qui contiennent des bulles sont fréquents. Les éléments radioactifs ont généralement le temps de se répartir de manière homogène dans la phase liquide. Le niveau atteint par les laves dépend alors de la quantité d'éboulis effectivement incorporés dans le bain, et de la taille de la cavité.

Pour le tir Hardhat [ 23 ] qui correspond à la formation d'une grande cavité et à une faible quantité d'éboulis dans le bain (27 %) le niveau des laves reste assez bas, à 3/4 environ du rayon de cavité au-dessous du point de tir. Au-dessus, les échantillons

Figure 7 - Position des roches fondues dans la cavité finale.

Interprétation du pourcentage de roches fondues en fonction de la distance verticale au point de tir du sondage (distance estimée en fraction de  $R_c$ ).



vitriifiés sont très rares, de l'ordre de 3 % des produits récupérés. Le niveau est très nettement supérieur pour le champ de tir saharien, où il atteint un demi-rayon de cavité au-dessus du point d'explosion. Le calcul montre que, pour une énergie d'engin équivalente, les quantités de laves sont sensiblement égales sur les deux champs de tir : le niveau est alors fonction de la taille de la cavité créée et de la quantité d'éboulis incluse dans le bain.

L'importance de la radioactivité au-dessus du point d'explosion de Handcar laisse à penser que ce tir dans la dolomie rentre dans cette catégorie [ 17 ]. Les laves se rencontreraient au-dessus du niveau de l'explosion. Ce fait n'a pas actuellement été confirmé.

### 3.2.2 - Etude de la répartition du contenu des cavités du champ de tir saharien

Sur ce dernier champ de tir, l'analyse permet d'aller plus loin. Certes les laves se rencontrent à tous les niveaux, en quantités variables comme le montre la figure 6. Cependant il existe un certain classement des produits ; la proportion de roches fondues par rapport aux éboulis tend globalement à croître avec la hauteur du point visé par le forage sur la verticale du point de tir. Un sondage qui passe assez bas dans la cavité récupère beaucoup plus de roches éboulées que de produits de fusion. Au-dessus du point d'explosion, les quantités de granite fondu et éboulé sont à peu de chose près équivalentes. La base de la cavité mise à part, il existe une relation linéaire approximative entre le pourcentage de lave et le niveau : il varie de 15 % au-dessus de la base à 50 % au niveau supérieur [ ce résultat diffère de celui du tir Hardhat - voir paragraphe précédent - , il y avait dans le domaine de roches fondues 73 % de laves et 27 % d'éboulis ].

A partir de la règle empirique déduite de la figure 7 une intégration permet de connaître la valeur approchée de la quantité de laves dans la cavité ; le volume des produits vitriifiés est de l'ordre de 40 % de celui de la cavité sphérique avant formation de la cheminée. Ceci correspond à environ 640 m<sup>3</sup> pour une explosion d'une énergie de 1 kt. Avec une densité voisine de 2, (les laves massives ont une densité de 2,3 mais certaines ponces peuvent avoir un poids spécifique inférieur à 1) il y a donc environ 1 300 tonnes de granite fondu. Ce résultat est comparable à celui obtenu avec d'autres méthodes.

### 3.3 - Propriétés physiques du contenu de la cavité

Les cavités présentent selon les milieux des contenus différents ; ce sont, de plus, des matériaux hétérogènes où les types de roches paraissent dans le détail se répartir au hasard. Cependant certaines qualités, dont l'intérêt est indubitable pour d'éventuelles applications industrielles, ressortent globalement dans la majorité des cas.

C'est ainsi que la cohésion des éboulis est assez uniforme. Ceci se manifeste dès l'étude des taux de récupération (voir paragraphe 1.2 et figure 1). Une bonne récupération dans les bas niveaux de la cavité aurait pu être le signe d'une compaction des éboulis sous l'action de la pesanteur. Ce n'est pas le cas - au moins pour les expériences du champ de tir saharien - et la cohésion des matériaux, assez faible, semble indépendante du niveau de prélèvement.

La perméabilité varie énormément selon les points ; en forage les blocs de laves massives sont imperméables mais les zones d'éboulis peuvent correspondre à des pertes d'eau importantes [ 24 ]. Comme ces dernières zones forment, dans tous les milieux, au moins la moitié du contenu de la cavité, la perméabilité est généralement élevée et comparable à celle d'éboulis [ à titre indicatif, la perméabilité de telles formations géologiques naturelles varie de 1 à 10<sup>4</sup> darcy ]. Cependant il faut s'attendre à ce que les couches de laves massives, en particulier dans le cas du tuf et des alluvions - forment des

écrans imperméables.

La porosité s'évalue par des méthodes indirectes qui donnent aussi des valeurs moyennes ; ses variations de détail sont comparables à celles de la perméabilité. Connaissant le foisonnement des éboulis et la masse de roche fondue, le calcul permet, en faisant intervenir certaines hypothèses, d'estimer cette porosité moyenne [ 4 ]. Sur le champ de saharien elle est de l'ordre de 10 %. Compte non tenu des vides créés par les bulles, elle est très faible dans les passées de laves et comparable à celle des cheminées [ 12 ] soit généralement voisine de 20 %, pour les zones d'éboulis.

La température qui règne dans la cavité est fonction de celle de solidification des produits liquides, des échanges avec les éboulis encore solides et des possibilités d'évacuation de la chaleur par le milieu ; pour ce dernier point, il s'agit principalement de la teneur en eau de la roche. L'ensemble de ces données sera repris dans un rapport sur les effets thermiques des explosions [ 20 ].

Son évolution est simple dans les grandes lignes. Ainsi, dans le granite, elle se stabilise autour de 650°C après la chute de la cavité ; ce chiffre représente vraisemblablement une moyenne entre la température de fusion de la masse de produits vitriifiés (1 300°C) et de ceux qui sont encore cristallisés. Elle diminue ensuite lentement dans les milieux anhydres car la conduction thermique des roches est en général faible. La température peut se maintenir à des degrés élevés durant des mois ou des années [ 9 ]. Dans le sel - tir Salmon [ 11 ] - la température des gaz de la cavité atteignait 200°C six mois après l'explosion. Elle tombe très vite dans les milieux à teneur en eau élevée : elle est ainsi de moins de 100°C dans le tuf et les alluvions, au moment où les forages pénètrent dans la zone proche du point d'explosion.

## CONCLUSION

L'étude géologique permet de dresser un bilan des transformations de la zone proche des tirs nucléaires souterrains. La cavité qui est formée dans les premiers instants de l'explosion et qui dans la majorité des cas s'effondre par la suite, est reconnue au moyen de sondages. Malgré une récupération rarement complète et une incertitude sur la position des échantillons, ces derniers donnent une image cohérente de la cavité.

La connaissance de sa forme est maintenant assurée. Elle est sphérique au moment de sa formation et subsiste telle quelle pour certaines expériences dans le sel gemme. Généralement, il y a effondrement du toit et il ne reste plus que la demi-sphère inférieure. La mesure de son rayon montre de grandes variations selon les milieux. Son contenu se compose de roches fondues et d'éboulis. Leur répartition dépend dans une large mesure des propriétés des matériaux. Ainsi dans le sel gemme, les laves se rassemblent seules à la base de la cavité. Dans le tuf et les alluvions, il n'y a pas mélange des produits liquides avec les éboulis. Les premiers forment une couche le long de la paroi alors que les seconds occupent le centre. Dans le granite, le mélange de ces roches conduit à relever le niveau atteint par les laves : sa position exacte dépend alors de la taille de la cavité. Dans chacun de ces cas, les propriétés physiques du milieu sont différentes mais, d'une façon générale, la cohésion des matériaux y est faible et la perméabilité et la porosité sont inversement assez grandes.

Cet accroissement de perméabilité ou de porosité du milieu, cette faible cohésion des blocs peuvent, maintenant que ces transformations sont connues, faciliter, par exemple, d'éventuelles exploitations minières ou pétrolières réalisées au moyen de l'explosif nucléaire.

## REFERENCES

- [ 1 ] S. DERLICH et F. SUPIOT (1968)  
Phénoménologie générale des explosions nucléaires souterraines.  
Rapport CEA 3750
- [ 2 ] S. DERLICH et J. FAURE (1968)  
Méthodes d'étude des forages réalisés autour des explosions nucléaires  
souterraines sur le terrain d'essai du Hoggar.  
Rapport CEA - en cours de publication.
- [ 3 ] S. DERLICH et J. FAURE (1967)  
Explosions nucléaires souterraines - Résultats généraux des études géolo-  
giques.  
Communication privée.
- [ 4 ] J. FAURE (1968)  
Explosions nucléaires souterraines - Effets sur la roche d'un massif de  
granite - Transformations d'ordre mécanique.  
Communication privée.
- [ 5 ] C. BOARDMAN, D. RABB, R. MAC ARTHUR (1964)  
Responses of four mediums to contained nuclear explosions.  
Journal of Geophysical Research, vol. 69, n° 16, pp. 3457-3469 TID 79 25  
pp. 109-124.
- [ 6 ] H. RODEAN (1967)  
Research for understanding and constructively using underground nuclear  
explosions.  
UCRL 50 276.
- [ 7 ] F. DELORT (1968)  
Lois de similitude des effets mécaniques des explosions nucléaires et chimiques  
souterraines.  
Communication privée.
- [ 8 ] J. BRUGIES et F. SUPIOT (1965)  
Communication privée.



- [ 9 ] P. PERROUD (1968)  
Rapports CEA-CENG
- [ 10 ] F. DUCLAUX (1967)  
Tenue du massif après l'exécution des tirs nucléaires souterrains du centre d'essais du Hoggar.  
Communication privée.
- [ 11 ] D. RAWSON, P. RANDOLPH, C. BOARDMAN, V. WHEELER (1965)  
Post explosion environment resulting from the Salmon event.  
UCRL 14 280.
- [ 12 ] S. DERLICH (1968)  
Explosions nucléaires souterraines - Etude de la cheminée.  
Rapport CEA - en préparation.
- [ 13 ] L. MICHAUD (1968)  
Explosions nucléaires souterraines - Etude du rayon de cavité.  
Rapport CEA 3594
- [ 14 ] G. HIGGINS, T. BUTKOVICH (1967)  
Effect of water content, yield, medium and depth of burst on cavity radii.  
UCRL 50 203.
- [ 15 ] C. BOARDMAN (1966)  
A measurement of the volume of void in the Shoal chimney.  
UCRL 50 150.
- [ 16 ] F. DUCLAUX, S. DERLICH, J. FAURE, H. FERRIEUX et M. PERRIER (1967)  
Liaison entre le rayon et la durée d'existence des cavités créées par les tirs nucléaires souterrains.  
C.R.A.S., Paris, t. 264, série B, pp. 496-497.
- [ 17 ] C. BOARDMAN, G. MEYER, D. RABB (1966)  
Macrodeformation resulting from the Handcar event.  
UCRL 50 149.
- [ 18 ] J. MAURY et C. LEVRET (1968)  
Explosions nucléaires souterraines - Physique des phénomènes en zone proche.  
Rapport CEA (reçu par Saclay le 22.5.69)
- [ 19 ] N. SHORT (1966)  
Nuclear explosions craters, astroblemes and crypto-explosions structures.  
UCRL 7787.
- [ 20 ] J. FAURE (1968)  
Explosions nucléaires souterraines - Etude des effets thermiques et minéralogiques.  
Rapport CEA - en préparation.

- [ 21 ] M. PERRIER (1968)  
Explosions nucléaires souterraines - Ecoute des bruits et interprétation.  
Rapport CEA - en cours de publication.
- [ 22 ] G. JOHNSON, G. PELSOR, R. PRESTON et C. VIOLET (1958)  
Nuclear underground explosion - 19 septembre 1957 - Rainier.  
UCRL 5124.
- [ 23 ] C. BOARDMAN (1966)  
Some characteristics of the Hardhat chimney and surrounding wall rock.  
UCRL 50 177.
- [ 24 ] S. DERLICH (1968)  
Communication privée.

*Manuscrit reçu le 25 Février 1969*

**FIN**