

CEA-R-4096 - ROLLIN François avec la collaboration de DELORT Francis
VOLUME DE STOCKAGE CREE PAR UNE EXPLOSION NUCLEAIRE
SOUTERRAINE CONTENUE

Sommaire. - Le calcul du volume de stockage créé par une explosion nucléaire souterraine contenue est détaillé pour quatre milieux géologiques : granite du Hoggar - sel - dolomite - granite du Nevada.

On présente différents résultats théoriques quant à l'influence de l'environnement sur le volume créé.

En conclusion on donne une application du calcul à la détermination des volumes de stockage off-shore.

1971

48 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-R-4096 - ROLLIN François with collaboration of DELORT Francis
STORAGE VOLUME CREATED BY A CONTAINED UNDERGROUND NUCLEAR
EXPLOSION

Summary. - The calculation of the storage volume created by a contained underground nuclear explosion is described in detail for four geological media : Hoggar granite, salt, dolomite, Nevada granite.

Different theoretical results concerning the influence of environment on the volume created are presented.

In conclusion the calculation is applied to the determination of off-shore storage volumes.

1971

48 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

5.0

**VOLUME DE STOCKAGE
CREE PAR UNE EXPLOSION NUCLEAIRE
SOUTERRAINE CONTENUE***par**François ROLLIN***SOUS-DIRECTION DES ESSAIS**

Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel

Rapport CEA-R-4096**1971**

De

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A.

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

- Rapport CEA-R-4096 -

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

VOLUME DE STOCKAGE
CREE PAR UNE EXPLOSION NUCLEAIRE SOUTERRAINE CONTENUE

par

François ROLLIN

avec la collaboration de Francis DELORT

- Mars 1971 -

TABLE DES MATIERES

	Pages
I - INTRODUCTION	5
II - CARACTERISTIQUES GENERALES DE MILIEUX FAVORABLES AU STOCKAGE	7
III - RAPPEL SUR LA REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES EFFETS D'UNE EXPLOSION NUCLEAIRE SOUTERRAINE CONTENUE	8
IV - APPLICATION AU CALCUL DES VOLUMES DISPONIBLES	8
a) - Granite du Hoggar (SAHARA)	8
b) - Dolomie : (tir Handcar)	14
c) - Sel : (tirs Gnome et Salmon)	15
d) - Granite du Nevada : (tirs Hardhat, Piledriver)	15
V - CAPACITE DE STOCKAGE DU RESERVOIR NUCLEAIRE	17
a) - Pression de stockage	17
b) - Température de stockage	17
c) - Volume disponible	18
d) - Hauteur des terrains de couverture	20
VI - APPLICATION NUMERIQUE	21
VII - INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SUR LE VOLUME DE STOCKAGE	23
a) - Porosité	23
b) - Température	27
c) - Calcul du volume de stockage	27
d) - Influence de la profondeur	27
VIII - APPLICATION AU STOCKAGE OFF SHORE	34
IX - CONCLUSION	45
BIBLIOGRAPHIE	47

VOLUME DE STOCKAGE CREE PAR UNE EXPLOSION NUCLEAIRE SOUTERRAINE CONTENUE

I - INTRODUCTION

L'emploi des hydrocarbures, comme source d'énergie dans l'industrie moderne s'accroît chaque année et le problème posé par le stockage devient donc de plus en plus important.

Sur le continent, parmi toutes les techniques utilisées actuellement, c'est certainement celle du stockage souterrain qui retient le plus l'attention pour des raisons d'intérêt stratégique et économique.

Le gaz peut être stocké, par exemple, dans les réservoirs d'hydrocarbures qui sont épuisés, ou encore dans des milieux salins où des cavités sont créées par dissolution. Cependant, ces milieux où le stockage est possible se trouvent souvent éloignés du point d'utilisation. Comme le transport du gaz sous pression par pipeline est d'un prix de revient relativement élevé, l'utilisation de cette méthode est restreinte.

Au large des côtes (off shore), les hydrocarbures sont le plus souvent stockés dans des bouées flottantes ou dans des réservoirs placés sur des barges. Les quantités stockées sont relativement faibles et les risques d'accident sont élevés.

L'énergie nucléaire peut apporter une solution à ces problèmes.

Dans la plupart des milieux, et en particulier dans les roches dures, une explosion nucléaire souterraine a deux effets principaux :

- elle provoque une cavité, suivie ou non de la formation d'une cheminée remplie d'éboulis, au milieu desquels les vides sont importants ;
- elle donne naissance à plusieurs zones de porosité et de perméabilité différentes.

On peut utiliser la cheminée et les zones de porosité accrues pour stocker les hydrocarbures. Deux exemples (figures 1 et 2) sont donnés :

- stockage des hydrocarbures sur le continent ;
- stockage des hydrocarbures off shore.

L'utilisation de l'explosif nucléaire pour réaliser un réservoir souterrain nécessite l'étude de nombreux problèmes, parmi lesquels nous pouvons citer :

- la connaissance géologique du terrain ;
- l'examen des caractéristiques du réservoir ;
- l'étude des problèmes de sécurité :

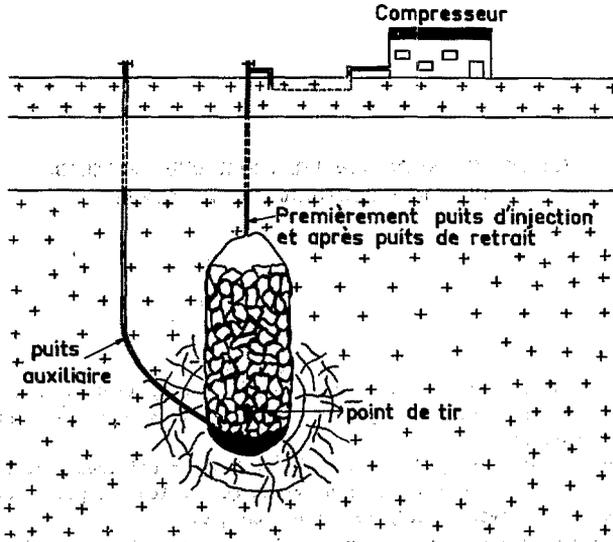


Figure 1 - Stockage sur le continent (Projet Ketch)

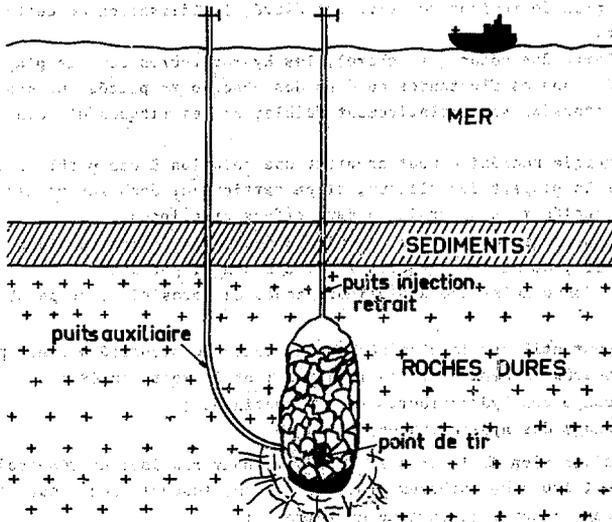


Figure 2 - Stockage off shore

- l'analyse de la rentabilité du procédé.

Ce rapport, qui constitue un premier stade de l'étude, s'attache à préciser les volumes utiles pour le stockage de gaz ou de liquide, pour différents cas d'explosion et de situations géologiques.

II - CARACTERISTIQUES GENERALES DE MILIEUX FAVORABLES AU STOCKAGE

L'élément essentiel est, naturellement, d'assurer l'étanchéité du réservoir. Pour cela, il faut que les fractures ouvertes par l'explosion nucléaire se situent dans une formation géologique stable et dépourvue de failles.

Les couches de matériaux durs et compacts, si elles possèdent une épaisseur convenable, semblent appropriées à la création de zones de stockage [2]. Nous pouvons citer par exemple :

- Calcaire compact
Un des milieux les plus favorables.

- Limon
S'il est massif

- Sel

- Dolomie

- Granite

D'une manière générale, les milieux friables contenant de l'eau ou très fracturés sont impropres à la création de réservoirs de stockage [2]. Ces milieux sont principalement :

- Alluvions, sables, graviers

Ils sont situés d'ordinaire trop près de la surface et renferment une forte teneur en eau.

- Calcaires visqueux

L'épaisseur de ces couches est mince et la teneur en eau forte.

- Schistes carbonatés

Ils sont défavorables car ils contiennent des restes de plantes et de matériaux carbonatés, qui créent des zones privilégiées pour la contamination et la fuite des produits stockés.

- Grès, charbon

Généralement, les couches sont tendres et friables et renferment une forte teneur en eau.

Pour déterminer les caractéristiques du réservoir créé par une explosion nucléaire souterraine, il est nécessaire d'utiliser différents modèles de structure [3]. Nous rappelons ci-après les différentes caractéristiques de ces modèles.

III - RAPPEL SUR LA REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES EFFETS D'UNE EXPLOSION NUCLEAIRE SOUTERRAINE CONTENUE

A partir des mesures de perméabilité, de porosité et de fracturation qui ont été effectuées à l'occasion d'explosions nucléaires souterraines contenues, on a schématisé, sous forme de modèles, les différentes zones d'effets.

Les techniques utilisées pour déterminer la perméabilité et la porosité du milieu avant et après tir sont souvent assez imprécises et rendent les mesures délicates à interpréter. Il convient donc de considérer les modèles proposés comme définissant une série de zones distinctes et non une forme géométrique exacte.

Les figures 3, 4, 5 et 6 caractérisent respectivement les modèles de structure d'un granite du Hoggar (SAHARA), du granite du Nevada, de la dolomie et du sel. Les tableaux des figures 7 et 8 sont un résumé des principales données.

IV - APPLICATION AU CALCUL DES VOLUMES DISPONIBLES

A - Granite du Hoggar (SAHARA)

Le modèle de la figure 3 est basé sur la généralisation des résultats obtenus pour une explosion dans le massif granitique du Tan Afella (Hoggar).

Le volume des vides s'exprime par $\phi \times V$

où ϕ = porosité de la zone considérée

V = volume de la zone considérée.

a) Remarques préliminaires

Il n'existe pas de données sur la porosité dans les zones de décompression A et B (figure 3) créées lors du desserrage des fractures dans les vides de la cheminée. Cependant, la perméabilité mesurée dans ces zones étant élevée, la porosité de fractures doit être importante. Elle entraîne une augmentation du volume utilisable :

$$V_{AB} = K R^3 / C$$

Le coefficient K n'ayant pas pu être déterminé faute de données, nous ne tiendrons pas compte du volume V_{AB} dans la détermination du volume total utilisable.

La porosité de la cheminée étant comprise entre deux valeurs, on leur a fait correspondre respectivement des volumes utilisables maximum et minimum (figure 8).

Dans les autres zones, zone broyée, zone des fractures et zone des rondelles, nous disposons de deux valeurs différentes de porosité. L'une, notée ϕ_D , est calculée à partir du nombre de fractures rencontrées dans les forages [4]. Cette porosité de fracture conduira au calcul du volume utilisable minimal. L'autre, notée ϕ_F , a été déterminée par un calcul basé sur les vitesses sismiques [5]. Elle exprime la porosité totale du milieu et servira donc à déterminer le volume utilisable maximal.

$a = \gamma_D$ porosité ref. 5
 $b = \gamma_F$ porosité ref. 4
 R_C rayon de cavité
 zones de décompression A et B

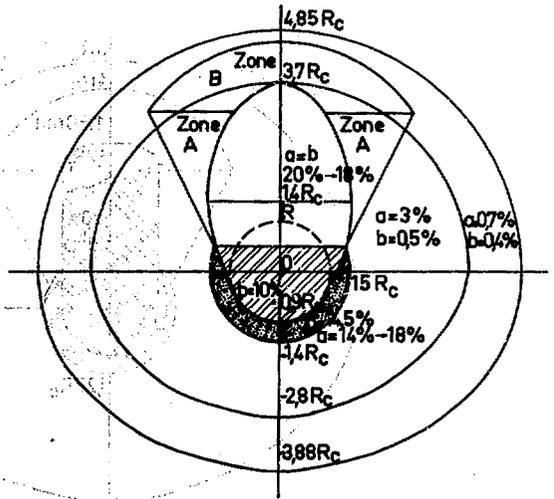


Figure 3 - Modèle pour le granite du Hoggar (Sahara)

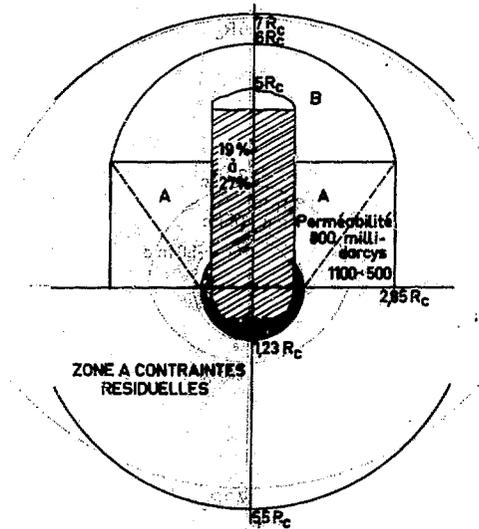


Figure 4 - Modèle pour le granite (U.S.)

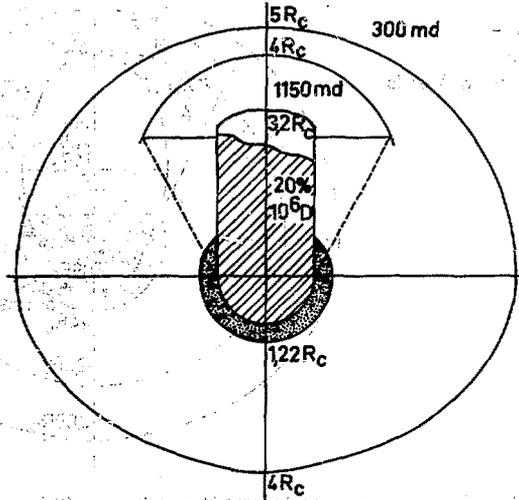


Figure 5 - Modèle pour la dolomie

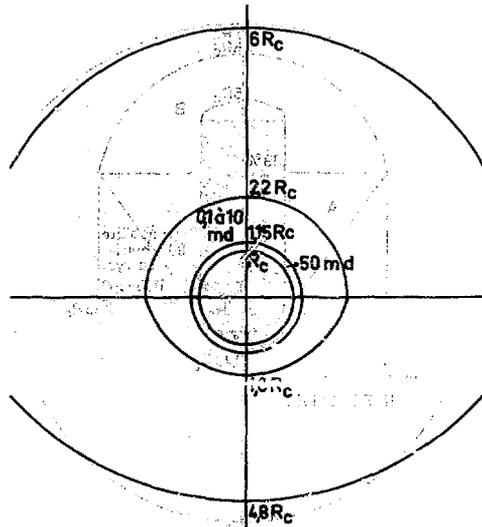


Figure 6 - Modèle pour le sel

Milieu	Cavité	Zone broyée	Cheminée	Fractures ; microdéformations		Porosité et perméabilité ; zones accrues		Zones à microdéformations	
				au-dessus du point de tir	en-dessous du point de tir	Zone A	Zone B	au-dessus du point de tir	en-dessous du point de tir
Granite du Hoggar	Sphère R_C	Ellipse $2a=3R_C$ $2b=2,8R_C$	Ellipse $2a=4,6R_C$ $2b=2,8R_C$	1/2 sphère $3,7 R_C$	1/2 ellipse $2a = 7,4 R_C$ $2b = 5,6 R_C$	tronc de cône	portion de sphère	1/2 sphère $4,85 R_C$	1/2 ellipse $2a = 9,7 R_C$ $2b = 7,7 R_C$
Granite du Nevada	Sphère R_C	sphère $1,23 R_C$	cylindre R_C $H = 5 R_C$			cône ou cylindre $R = 2,85R_C$	portion sphérique épaisseur $1 R_C$	1/2 sphère $7 R_C$	1/2 ellipse $2a = 14 R_C$ $2b = 11 R_C$
Dolomie	Sphère R_C	sphère $1,22 R_C$	cylindre R_C $H=3,2 R_C$	1/2 sphère $5 R_C$	1/2 ellipse		portion sphérique épaisseur $1 R_C$		
Sel	Sphère R_C	sphère $1,15 R_C$	sans	1/2 sphère $2,2 R_C$	1/2 ellipse $2a = 4,4 R_C$ $2b = 3,6 R_C$			1/2 sphère $6 R_C$	1/2 ellipse $2a = 12 R_C$ $2b = 9,6 R_C$

Figure 7 - Dimensions des zones. - Unité de dimension = R_C : rayon de cavité

Remarque : Il n'a pas été trouvé de données permettant de préciser la forme des zones dans les cases hachurées.

Milieu		Initiale	Zone broyée	Cheminée	Zone à microfracturation	Zones à K et fortement accrues				Zones à microfracturation (ou rondelles)
						Zone A		Zone B		
Granite du Hoggar	Perméabilité K md	très faible	10	10^4 10^6	200 50	800 600	300 200		50 3	
	Porosité ϕD ϕi ϕF	0,1 à 0,3	18 14 14,5	20 18 20 18	3 0,5		0,4		0,7 0,4	
Granite du Nevada	Perméabilité K md	très faible			1100 500				15	
	Porosité ϕi			27 19						
Dolomie U.S.A.	Perméabilité K md	150 à 300		10^6			1150			
	Porosité ϕi	6		20						
Sel U.S.A.	Perméabilité K md			50		10 0,1				
	Porosité ϕi	2,7								

Figure 8 - Perméabilité et porosité des zones

Ainsi, nous avons :

$$V_{MAX} = \phi_D \times V$$

$$V_{MIN} = \phi_F \times V$$

b) Calcul des volumes

1° - Volume utilisable de la cheminée

- Volume de l'ellipsoïde de révolution :

$$V_1 = \frac{4}{3} \pi (2,3) R_C (1,4)^2 R_C^2$$

$$V_1 = 18,88 R_C^3$$

- Volume des laves :

Les laves produites au moment de l'explosion s'écoulent le long des parois de la cavité et viennent se rassembler au fond de la cavité. Bien qu'elles possèdent une porosité estimée à 10 %, elles sont très peu perméables et réduisent ainsi le volume utilisable en vue de stockage. Dans le cas des explosions du Hoggar, on a estimé à 1300 tonnes par kt [6] la masse des laves produites par un tir nucléaire contenu. Le calcul conduit au volume occupé par les laves :

$$V_2 = 1,58 R_C^3 .$$

- Volume utilisable de la cheminée :

Nous obtenons donc pour le volume utilisable de la cheminée :

$$V_{CH MAX} = (V_1 - V_2) 0,2 = 3,46 R_C^3$$

$$V_{CH MIN} = (V_1 - V_2) 0,18 = 3,11 R_C^3$$

Remarques :

Les valeurs de la porosité de la cheminée sont celles correspondant à un tir particulier. Elles se rapprochent des valeurs moyennes de porosités pour tous les tirs souterrains français [4] [5].

2° - Volume utilisable de la zone broyée

- Volume de l'ellipsoïde de révolution :

$$V_4 = 6,16 R_C^3$$

- Volume de la zone broyée

$$V_5 = V_4 - \frac{V_C}{2}$$

$$V_5 = 4,06 R_C^3$$

- Volume utilisable de la zone broyée :

$$V_{BMAX} = V_5 \times 0,18 = 0,73 R_C^3$$

$$V_{BMIN} = V_5 \times 0,145 = 0,59 R_C^3$$

3° - Volume utilisable de la zone fracturée

- Volume total :

- . Partie supérieure :

$$V_6 = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R_f^3 = 106,09 R_C^3$$

- . Partie inférieure :

$$V_7 = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi (3,7) (2,8)^2 R_C^3 = 60,75 R_C^3$$

- Volume effectif :

$$V_f = V_6 + V_7 - (V_1 + V_B)$$

$$V_f = 143,90 R_C^3$$

- Volume utilisable de la zone fracturée :

$$V_{fMAX} = V_f \times 0,03 = 4,32 R_C^3$$

$$V_{fMIN} = V_f \times 0,005 = 0,72 R_C^3$$

4° - Volume utilisable de la zone à contraintes résiduelles

- Volume de la demi-sphère :

$$V_8 = 238,94 R_C^3$$

- Volume du demi-ellipsoïde :

$$V_9 = 152,92 R_C^3$$

- Volume effectif :

$$V_T = V_8 + V_9 - V_f$$

$$V_T = 247,96 R_C^3$$

- Volume utilisable de la zone à contraintes résiduelles :

$$V_{TMAX} = V_T \times 0,007 = 1,74 R_C^3$$

$$V_{TMIN} = V_T \times 0,004 = 0,99 R_C^3$$

5° - Remarque

V_{fMAX} et V_{TMAX} possèdent une valeur élevée, mais il ne faut pas oublier que la porosité ϕ_D tient compte de tous les vides du milieu. Il ne faut donc considérer ces résultats que pour situer le maximum du volume utilisable en vue de

stockage. Il est probable que les quantités V_{fMIN} et V_{rMIN} se rapprochent plus de la réalité.

c) Volume total utilisable

Dans le cas de l'utilisation d'une explosion nucléaire souterraine en vue de stockage, nous pouvons donc déterminer le volume maximal et le volume minimal utilisables.

On obtient pour le granite du Hoggar :

$$V_{MAX} = 10,25 R_C^3$$

$$V_{MIN} = 5,41 R_C^3$$

Remarques :

Aux U.S.A., ont été réalisées des mesures par injection d'air du volume utilisable de la cheminée et des zones altérées. En première approximation, la zone fracturée possède un volume de vides équivalent à celui de la cheminée.

Il apparaît ainsi que le volume utilisable engendré par l'explosion posséderait une valeur double de celui de la cavité créée.

Cela confirme la remarque précédente : le volume probable utilisable se rapproche plus de la valeur V_{MIN} trouvé précédemment. Dans le cas d'études économiques éventuelles, on peut prendre en première approximation un volume probable défini par :

$$V_p = \frac{V_{MAX} + 3 V_{MIN}}{4}$$

d) Généralisation

Nous pouvons généraliser la méthode de calcul du volume des vides utilisables, employée pour le granite du Hoggar à tous les milieux.

Nous obtenons :

$$V : (V_{ch} \times \phi_{ch}) + (V_B \times \phi_B) + (V_f \times \phi_f) + (V_r \times \phi_r)$$

V : Volume utilisable total

V_{ch} : Volume de la cheminée

V_B : Volume de la zone broyée

V_f : Volume de la zone fracturée

V_r : Volume de la zone à contraintes résiduelles

$\left. \begin{array}{l} \phi_{ch} \\ \phi_B \\ \phi_f \\ \phi_r \end{array} \right\}$	= porosité moyenne de la	$\left\{ \begin{array}{l} \text{cheminée} \\ \text{zone broyée} \\ \text{zone fracturée} \\ \text{zone à contraintes résiduelles} \end{array} \right.$
----------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

B. - La dolomie (tir Handcar)

Le modèle de la figure 7 est basé sur la généralisation des résultats obtenus pour le tir américain Handcar dans la dolomie. De la même manière que

précédemment nous allons appliquer ce modèle au calcul du volume des vides créés par une explosion nucléaire souterraine dans la dolomie.

a) Remarques préliminaires

1° - Bien que nous ayons pu délimiter les principales zones créées par une explosion nucléaire souterraine dans la dolomie, aucune valeur de porosité, si ce n'est celle de la cheminée, n'a pu être trouvée dans la bibliographie pour caractériser ces zones. Le volume total utilisable devra donc être considéré comme un volume minimal pour ce cas.

2° - D'autre part, nous ne tiendrons pas compte du volume occupé par les laves dans le calcul du volume utilisable. En effet, celui-ci peut être considéré comme négligeable (moins de 3 % du volume de la cavité dans le cas d'Handcar [7]).

b) Calcul du volume utilisable

- Volume de la demi-cavité sphérique :

$$V_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi R_C^3 \times 0,2 = 0,61 R_C^3$$

- Volume du cylindre :

$$V_2 = \pi R_C^2 \times 3,2 R_C \times 0,2 = 2,92 R_C^3$$

- Volume total utilisable :

$$V_D = V_1 + V_2 = 3,53 R_C^3$$

C - Le sel (tirs Gnome et Salmon)

Le calcul du volume disponible a été appliqué au modèle de la figure 8 basé sur la généralisation des résultats obtenus pour les tirs américains Gnome et Salmon effectués dans le sel.

a) Remarques préliminaires

Il n'existe aucune donnée sur la porosité dans les différentes zones.

Il n'y a pas de formation de cheminée dans le sel ; en conséquence, on prend le volume utilisable égal au volume de la cavité créée, auquel on retranche le volume occupé par les laves [7] (environ 10 % de V_C).

b) Volume utilisable

$$V = \left[\frac{4}{3} \pi R_C^3 - V_{\text{laves}} \right] = 3,78 R_C^3$$

D - Granite du Nevada (tirs Hardhat et Piledriver)

Le modèle de la figure 4 est basé sur la généralisation des résultats obtenus à partir des tirs américains Piledriver et Hardhat dans le granite du Nevada.

- Pour le calcul du volume de stockage utilisable :
- on distingue le volume occupé par les laves (moins de 3 % de V_C)
 - il n'y a pas de données de porosité, ce qui conduit à estimer un volume minimal.

Volume utilisable (en m^3) :

- Volume de la demi-cavité

$$V_1 = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi R_C^3 \times 0,23 = 0,52 R_C^3$$

- Volume du cylindre

$$V_2 = \pi R_C^2 \times 5 R_C \times 0,23 = 3,61 R_C^3$$

- Volume total utilisable

$$V_6 = V_1 + V_2 = 4,13 R_C^3$$

Le tableau de la figure 9 donne la répartition des volumes utilisables pour différents milieux.

Figure 9

Répartition des volumes utilisables

Milieu	Volume cheminée (m^3)	Volume laves (m^3)	Volume zone broyée (m^3)	Volume zone des fractures (m^3)	Volume zone à contraintes résiduelles (m^3)	Volume total utilisable (m^3)
Granite du Hoggar	Maxi. 3,46 R_C^3		0,73 R_C^3	4,32 R_C^3	1,74 R_C^3	10,25 R_C^3
	Mini. 3,11 R_C^3	1,58 R_C^3	0,59 R_C^3	0,72 R_C^3	0,99 R_C^3	5,41 R_C^3
Granite du Nevada	4,09 R_C^3					4,09 R_C^3
Dolomie	3,53 R_C^3					3,53 R_C^3
Sel	3,78 R_C^3					3,78 R_C^3

Remarques :

Nous n'avons pas trouvé de données permettant de préciser la valeur du volume utilisable dans les cases hachurées.

V - CAPACITE DE STOCKAGE DU RESERVOIR NUCLEAIRE

A - Pression de stockage

- Les hydrocarbures volatils seront stockés sous pression dans la cheminée et dans les zones de porosité accrue, qui résultent d'une explosion nucléaire souterraine et contenue. Cette pression ne doit pas être trop élevée à cause du risque de rupture de la couverture.

Nous avons pris, comme limite de la pression de stockage, la pression lithostatique du milieu au point d'explosion.

Certains effets secondaires pourront être observés. En particulier, il est probable qu'un certain nombre de fractures, fermées par la pression lithostatique, seront réouvertes. La capacité de stockage du réservoir se trouvera ainsi augmentée. Il est difficile d'estimer cette augmentation qui trouvera sans doute sa confirmation dans des faits expérimentaux.

- Les hydrocarbures liquides ne peuvent pas être stockés sous pression. Le volume de stockage sera donc, dans ce cas, le volume simple des zones altérées. Ce volume doit être considéré comme maximum. Il est probable, en effet, qu'une certaine quantité d'hydrocarbures liquides sera définitivement perdue, du fait des phénomènes de capillarité. Là encore, seules des données expérimentales conduiront à estimer cette perte. Cependant, en injectant de l'air sous pression dans le réservoir, une grande partie des hydrocarbures liquides contenus dans les fractures pourrait être récupérée.

B - Température de stockage

Une explosion nucléaire souterraine provoque une brusque élévation de la température dont l'évolution spatiotemporelle est assez lente [6]. La répartition des températures dans les différentes zones n'est pas uniforme et il convient de distinguer :

- le coeur des laves fondues où la température atteint 600°C.
- la cavité et la cheminée où l'équilibre s'établit vers 70°C (température quelques jours après le tir, ramenée à la température ambiante après communication avec la surface).
- les différentes zones de fractures dont la température n'est pratiquement pas affectée.

On peut remarquer que les valeurs précédentes proviennent des mesures réalisées autour des tirs du Hoggar dans le granite.

On pourrait observer des températures nettement différentes dans d'autres conditions de tirs, suivant la profondeur, la teneur en eau du milieu, etc...

Les hydrocarbures, qu'ils soient volatils ou non, ne pourront être stockés dans la cheminée à une température trop élevée. Il est possible même que, dans certains cas, le refroidissement de la cheminée s'avère indispensable. Ceci peut être réalisé, soit par des injections d'air, soit par des injections d'eau.

C - Volume disponible

Les hydrocarbures liquides seront stockés aux conditions ambiantes de température et de pression. Le volume de stockage sera pris dans ce cas égal au volume utilisable.

Les hydrocarbures volatils vont passer par les deux états suivants :

Etat initial : T_1 V_1 P_1

T_1 = température extérieure 20°C

V_1 = volume du gaz stocké aux conditions ambiantes de température et de pression (20°C - 1 bar)

P_1 = pression atmosphérique.

Etat final : T_2 V_2 P_2

T_2 = température finale des gaz stockés.

V_2 = volume utile

P_2 = pression lithostatique.

Cette transformation peut être représentée dans le plan (P, T) (figure 10). Afin de calculer V_2 , volume du gaz stocké aux conditions ambiantes de températures et de pression, on envisage deux transformations successives :

- une transformation isobare,
- une transformation adiabatique.

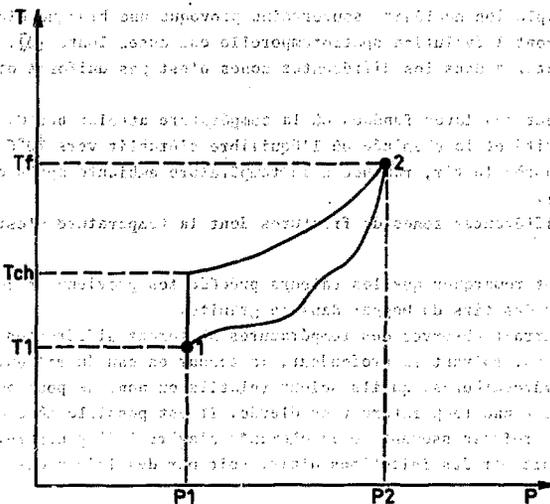
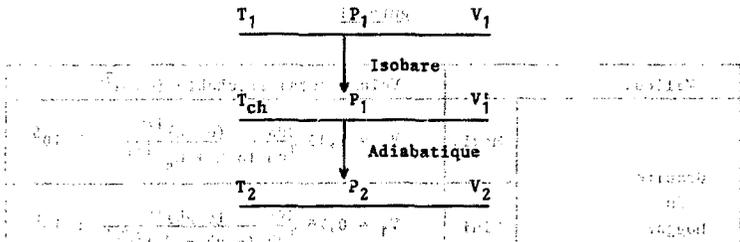


FIGURE 10



Nous supposons que la cheminée a été préalablement refroidie à la température ambiante locale déterminée par le gradient géothermique. Ce qui permet d'appliquer les calculs aussi bien aux zones altérées qu'à la cheminée.

- T_{ch} = température ambiante locale
- P_2 = pression lithostatique du milieu au point de tir
- V_2 = volume de stockage utile.

La transformation adiabatique conduit à :

$$V_1^\gamma P_1 = V_2^\gamma P_2$$

$$V_1 = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/\gamma} V_2$$

La transformation isobare nous permet d'écrire :

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V'_1}{T_{ch}}$$

soit : $V_1 = \frac{T_1}{T_{ch}} V_2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/\gamma}$

Cette formule nous permet de calculer le volume (ramené à la pression atmosphérique et à une température de 293°K) du gaz stocké dans la cheminée et dans les zones altérées.

Les résultats pour différents milieux obtenus à partir de la figure 9 sont consignés sur la figure 11, en prenant pour rayon de cavité celui défini dans la référence [8]

avec $r_c = 152 \frac{W^{1/3}}{(pgh + C_c)^{1/3\gamma}}$

Remarque : La température finale des gaz stockés peut être calculée à partir de la relation : $\frac{T_{ch}}{T_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/\gamma - 1}$

Si on prend $T_{ch} = 40^\circ C$ $P_L = 175$ bars $P_1 = 1$ bar $\gamma = \frac{4}{3}$,

on trouve : $T_2 = 145^\circ C$.

Figure 11

Milieux		Volume total stockable (en m ³)	
Granite du Hoggar	Maxi.	$V_1 = 1,43 \frac{293}{T_{ch}} \frac{(\rho gh)^{1/\gamma}}{(\rho gh + C_s)^{1/\gamma}}$	$W 10^6$
	Mini.	$V_1 = 0,76 \frac{293}{T_{ch}} \frac{(\rho gh)^{1/\gamma}}{(\rho gh + C_s)^{1/\gamma}}$	$W 10^6$
Granite du Nevada		$V_1 = 0,58 \frac{293}{T_{ch}} \frac{(\rho gh)^{1/\gamma}}{(\rho gh + C_s)^{1/\gamma}}$	$W 10^6$
Dolomie		$V_1 = 0,34 \frac{293}{T_{ch}} \frac{(\rho gh)^{1/\gamma}}{(\rho gh + C_s)^{1/\gamma}}$	$W 10^6$
Sel		$V_1 = 0,59 \frac{293}{T_{ch}} \frac{(\rho gh)^{1/\gamma}}{(\rho gh + C_s)^{1/\gamma}}$	$W 10^6$

T_{ch} : température ambiante locale (dépendant du gradient géothermique)
 h : hauteur de couverture

ρ : densité du milieu - g : accélération de la pesanteur - γ : coef. d'expansion adiabatique du gaz stocké

C_s : coefficient de structure du milieu de structure.

La formule donnant le volume de gaz stockable pour différentes énergies de tir et selon les caractéristiques du milieu s'exprime :

$$V_{st} = A \frac{293}{T_{ch}} \frac{(\rho gh)^{1/\gamma}}{(\rho gh + C_s)^{1/\gamma}} W 10^6 \quad (m^3)$$

D - Hauteur des terrains de couvertures

Même si la nature du terrain répond à l'impératif d'étanchéité exigé par le stockage, il faut veiller à ce que les effets de l'explosion ne créent pas des conditions propres à favoriser la fuite des produits stockés. En particulier, il ne faut pas que la fracturation se propage jusqu'à la surface, provoquant ainsi la fuite des hydrocarbures volatils. L'explosion doit donc être parfaitement contenue. On admet généralement que cette condition est réalisée si le tir a lieu à une profondeur telle que :

$$h = 140 \left(\frac{W}{\rho} \right)^{1/3}$$

h en m
 W en kt
 ρ en g/cm³

Nous choisirons comme hauteur des terrains de couverture : $h = 140 W^{1/3}$ qui correspond à la limite de la zone d'écaillage pour le granite du Hoggar, et nous la généraliserons à tous les milieux.

Nous obtenons alors pour le volume des gaz (en m^3) :

$$V = A 140^{1/\gamma} \frac{293 \cdot 10^6}{T_{ch}} \frac{\rho^{1/\gamma} g^{1/\gamma}}{(140 \cdot g W^{1/3} + C_s)^{1/\gamma}} W^{1/3\gamma+1}$$

En vue des applications numériques qui vont suivre nous avons consigné sur la figure 12 les différentes caractéristiques de quatre milieux géologiques.

Figure 12

Milieu	A	ρ (g/cm ³)	γ	C _s (bar)
Granite du Hoggar	1,43 maxi 0,76 mini	2,75	1,03	220
Granite du Nevada	0,58	2,69	1,03	30
Dolomie	0,34	2,3	1,03	110
Sel	0,59	2,2	1,09	30

VI - APPLICATION NUMERIQUE

Les applications numériques fournissent les éléments suivants :

- la hauteur de confinement
- la hauteur d'étanchéité
- la valeur du rayon de cavité
- la limite d'extension des zones altérées
- le volume utilisable
- le volume de stockage

en fonction de différentes énergies d'explosion.

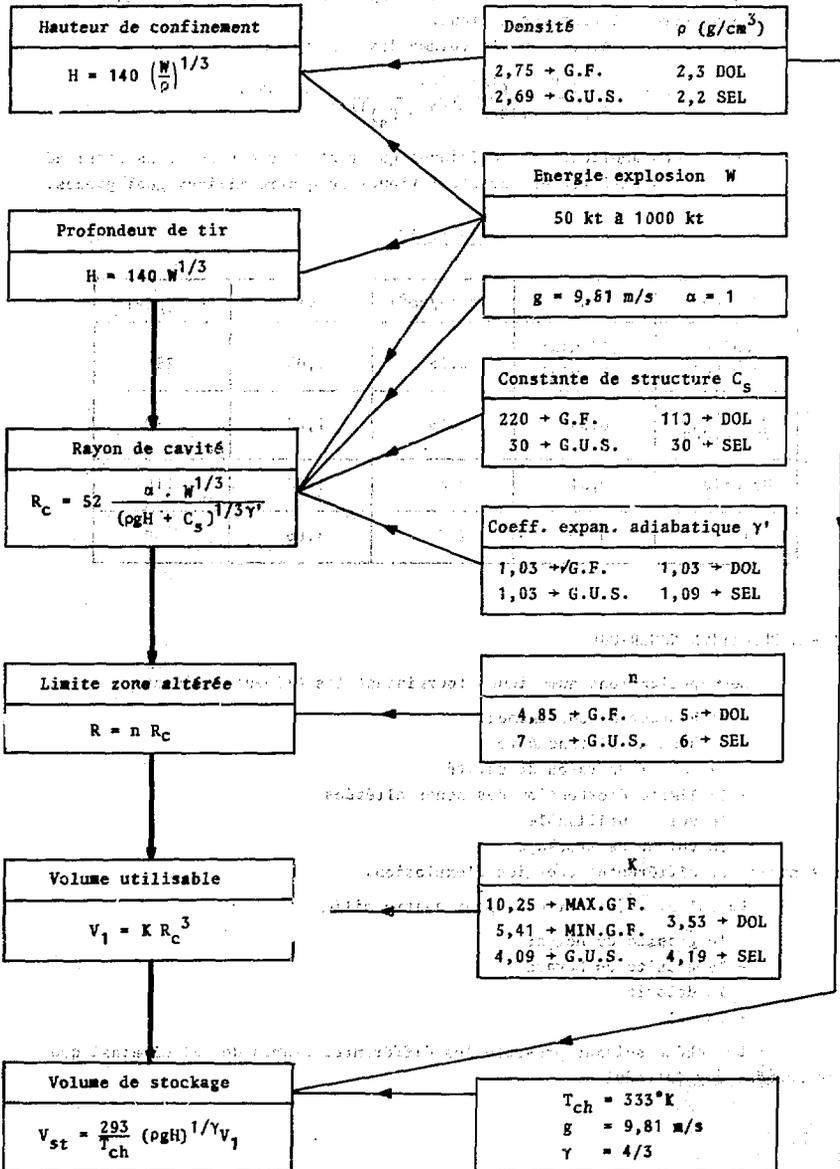
Le calcul a été effectué pour quatre milieux :

- le granite du Hoggar
- la granite du Nevada
- la dolomie
- le sel.

Le schéma suivant présente les différentes étapes de calcul ainsi que les données à y introduire.

Schéma

Données à introduire



Calcul pour le granite du Hoggar

Pour le granite du Hoggar, le calcul numérique a permis de déterminer les volumes de stockage maxima et minima pour différentes énergies d'explosion variant de 50 à 1000 kt. Les figures 13 et 14 représentent respectivement le cas des hydrocarbures liquides et le cas des hydrocarbures volatils.

La dispersion des mesures de porosité ne permet pas d'estimer le volume de stockage de façon plus précise.

L'analyse des résultats pour le granite du Hoggar montre que la capacité de stockage est comprise entre :

- $180 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ pour 50 kt et $2100 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ pour 1000 kt dans le cas des hydrocarbures liquides ;

- $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour 50 kt et $175 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour 1000 kt pour les hydrocarbures volatils.

La capacité de stockage est donc relativement importante.

Remarque :

1° - Nous venons de calculer le volume de stockage dans le cas d'un milieu homogène. Si la couverture des terrains au-dessus de l'explosion est hétérogène (cas des explosions off shore), on remplace :

$$\rho gh + C_s \quad \text{par} \quad \sum_i \rho_i gh_i + C_{s_i}$$

$$\rho gh \quad \text{par} \quad \sum_i \rho_i gh_i$$

dans les différentes formules précédemment établies.

2° - Le calcul numérique a été appliqué au granite du Hoggar car c'est le milieu où nous possédons le plus de données. Il reste néanmoins valable en première approximation pour : le granite du Nevada, la dolomie, le sel.

VII - INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SUR LE VOLUME DE STOCKAGE

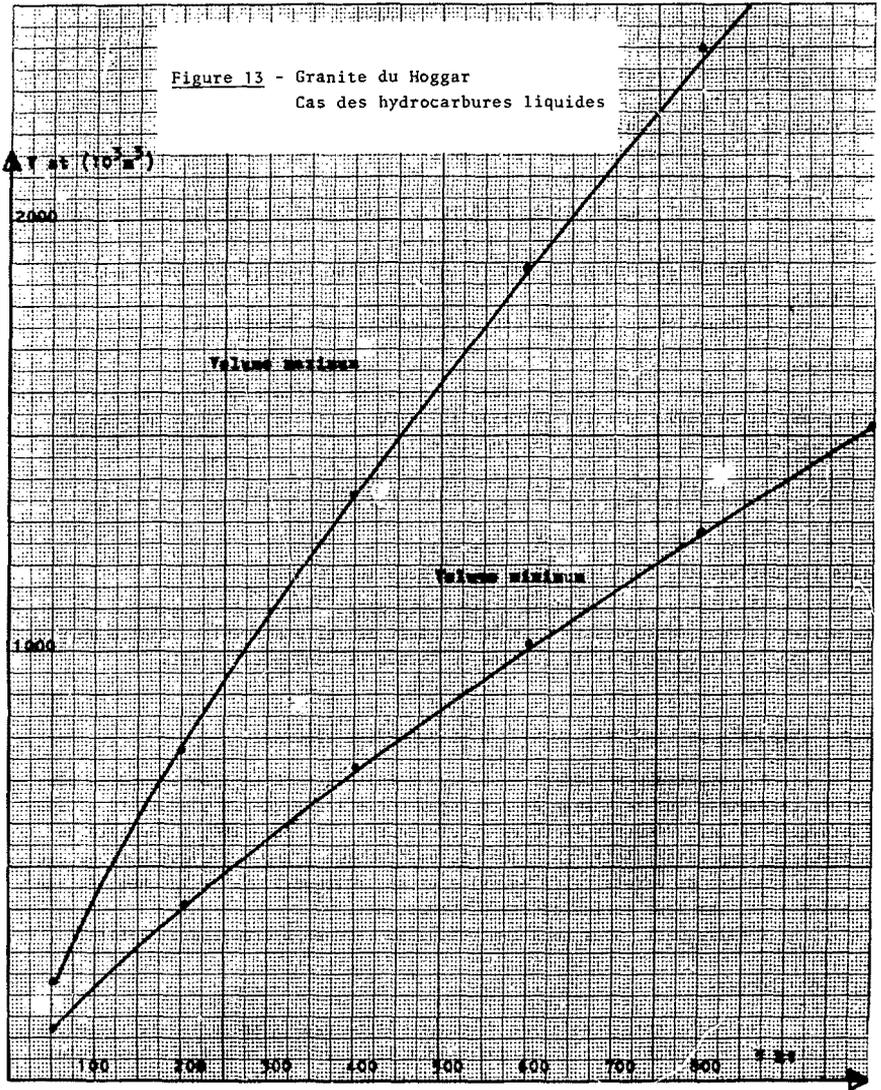
Au paragraphe précédent, nous avons fait apparaître l'influence de plusieurs paramètres sur le volume de stockage. Outre l'énergie de l'explosif et la profondeur du tir, d'autres facteurs interviennent : la porosité, la densité du milieu, la température de la cheminée, le coefficient d'expansion adiabatique etc...

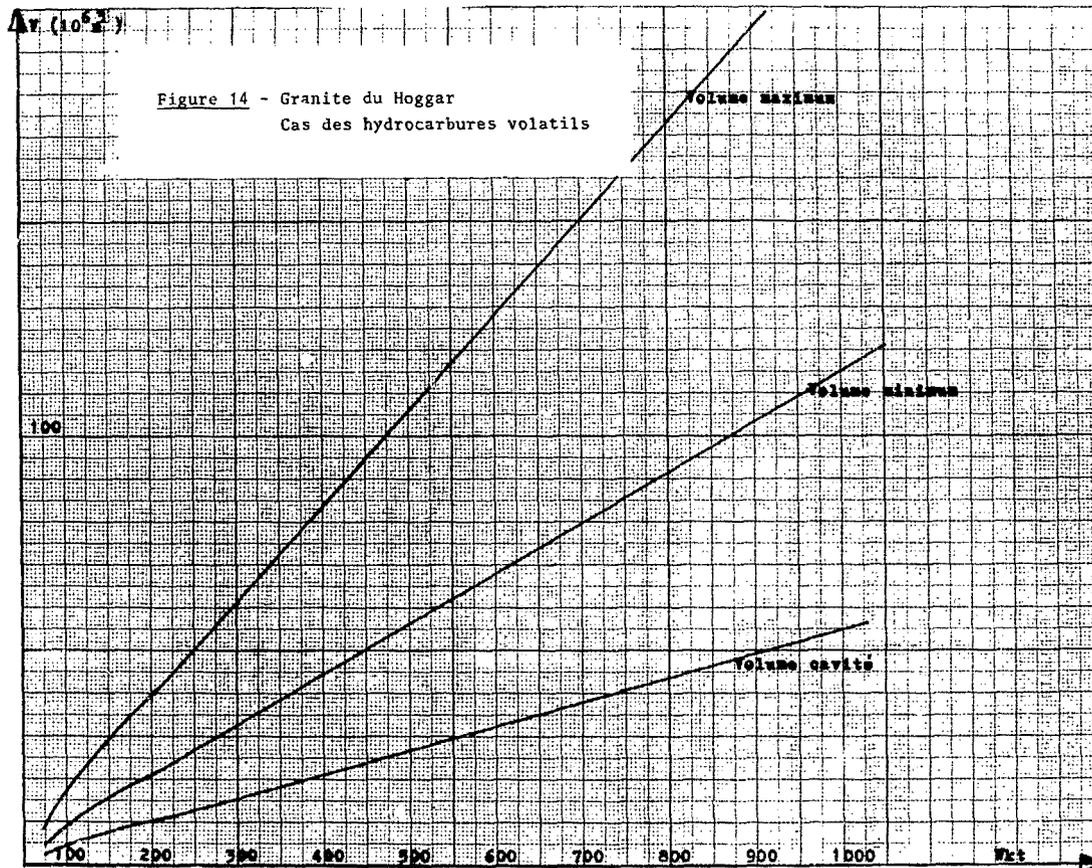
Seuls les effets de la porosité et de la température de la cheminée sont examinés ici, car leur influence est prépondérante.

D'autre part, nous nous limiterons au cas des hydrocarbures volatils.

A - Porosité

Les différents modèles de structure d'une explosion nucléaire souterraine et contenue sont valables, quelles que soient les énergies de tirs et les profondeurs utilisées. Il n'en est pas de même des valeurs de porosité dans les différentes zones, qui dépendent de la profondeur de l'explosion.





Les valeurs de porosité que nous possédons pour le granite du Hoggar correspondent à une profondeur moyenne de tir de 400 mètres. Comme il est difficile de prévoir l'influence de la profondeur sur la porosité, nous nous sommes placés dans le cas le plus défavorable. Nous devons supposer une porosité nulle dans les zones altérées, pour une profondeur supérieure à 3000 mètres.

Nous avons considéré, d'autre part, que la diminution de porosité suivait une loi linéaire de la forme :

$$\phi = ah + b \quad (F)$$

Seule, la zone broyée, la zone fracturée et la zone à contraintes résiduelles vont être affectées par cette diminution de porosité pour des profondeurs d'explosion comprises entre 400 et 3000 mètres. La cheminée et les zones de dé-compression liées à sa formation garderont une porosité non altérée.

Le volume utilisable sera donc fonction de la profondeur et il convient de distinguer les deux cas suivants :

- $h < 3000 \text{ m}$
- $h > 3000 \text{ m}$.

1° - $h < 3000 \text{ m}$

L'application de la formule (F) aux zones altérées par l'expansion de la cavité et par la propagation de l'onde de choc conduit aux volumes de stockage disponibles suivants : (en m^3).

a) - Cheminée

$$V_{\text{CH,MAX}} = 3,46 R_C^3$$

$$V_{\text{CH,MIN}} = 3,11 R_C^3$$

b) - Zone pulvérisée

$$V_{\text{P,MAX}} = (-0,281 \cdot 10^{-3} h + 0,843) R_C^3$$

$$V_{\text{P,MIN}} = (-0,227 \cdot 10^{-3} h + 0,681) R_C^3$$

c) - Zone fracturée

$$V_{\text{f,MAX}} = (-1,662 \cdot 10^{-3} h + 4,986) R_C^3$$

$$V_{\text{f,MIN}} = (-0,277 \cdot 10^{-3} h + 0,831) R_C^3$$

d) - Zone à contraintes résiduelles

$$V_{\text{r,MAX}} = (-0,669 \cdot 10^{-3} h + 2,007) R_C^3$$

$$V_{\text{r,MIN}} = (-0,381 \cdot 10^{-3} h + 1,143) R_C^3$$

e) - Volume utile total

$$V_{\text{t2 MAX}} = (-2,612 \cdot 10^{-3} h + 11,296) R_C^3$$

$$V_{\text{t2 MIN}} = (-0,885 \cdot 10^{-3} h + 5,765) R_C^3$$

2° - $h > 3000 \text{ m}$

Seules subsistent pour le volume utilisable la cheminée et les zones de

compression, nous obtenons donc : (en m³)

$$V_{t_3} \text{ MAX} = 3,46 R_C^3 + K R_C^3$$

$$V_{t_3} \text{ MIN} = 3,11 R_C^3 + K R_C^3$$

(le coefficient K provient de l'indétermination sur le volume des zones de dé-compression).

B - Température

La température de la cheminée ne pourra pas être rendue inférieure à la température du sol à cette profondeur, donnée par le gradient géothermique (distance verticale d'enfoncement dans le sol correspondant à une élévation de température de 1°C).

On prend généralement comme valeur moyenne du gradient géothermique 3°/100 mètres.

Si nous prenons la température en surface égale à 20°C, nous obtenons :

$$T_{ch} = 0,03 h + 293$$

C - Calcul du volume de stockage

Le volume de stockage se trouve modifié par l'introduction de ces deux lois linéaires. Un nouveau programme de calcul a donc été établi dont la schématisation est donnée figure 15.

On trouvera figure 16, les courbes donnant :

- le volume de stockage maximal
- le volume de stockage minimal
- le volume de stockage calculé à partir du volume de la cavité seule, (il a été tenu compte de la diminution de volume due à la présence des laves).

Le volume de stockage pour les hydrocarbures volatils apparaît donc supérieur au volume créé par la cavité. En effet, pour une explosion nucléaire de 1000 kt, le volume de stockage créé par la cavité est environ de 55 millions de mètres cubes, tandis que le volume de stockage moyen atteint 130 millions de mètres cubes, soit un peu plus du double. Les zones altérées jouent donc un grand rôle dans la prévision du volume de stockage créé par une explosion nucléaire.

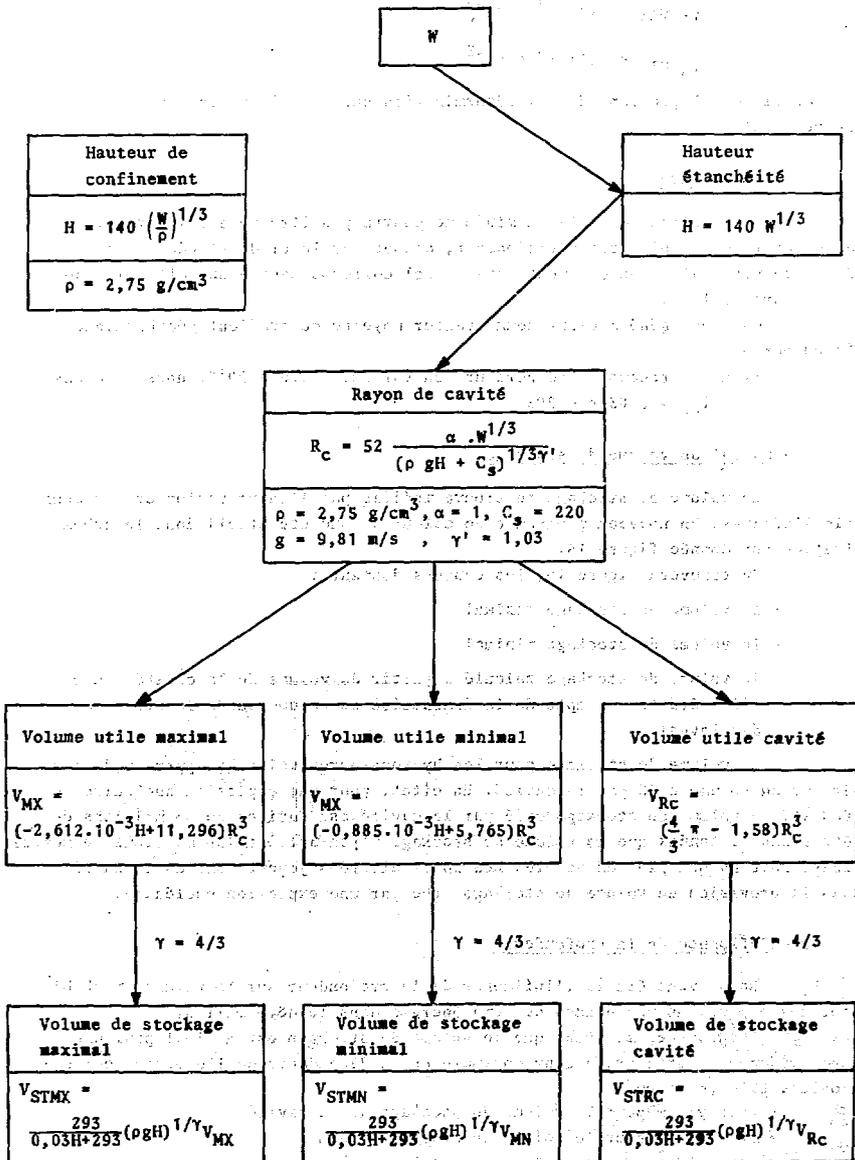
D - Influence de la profondeur

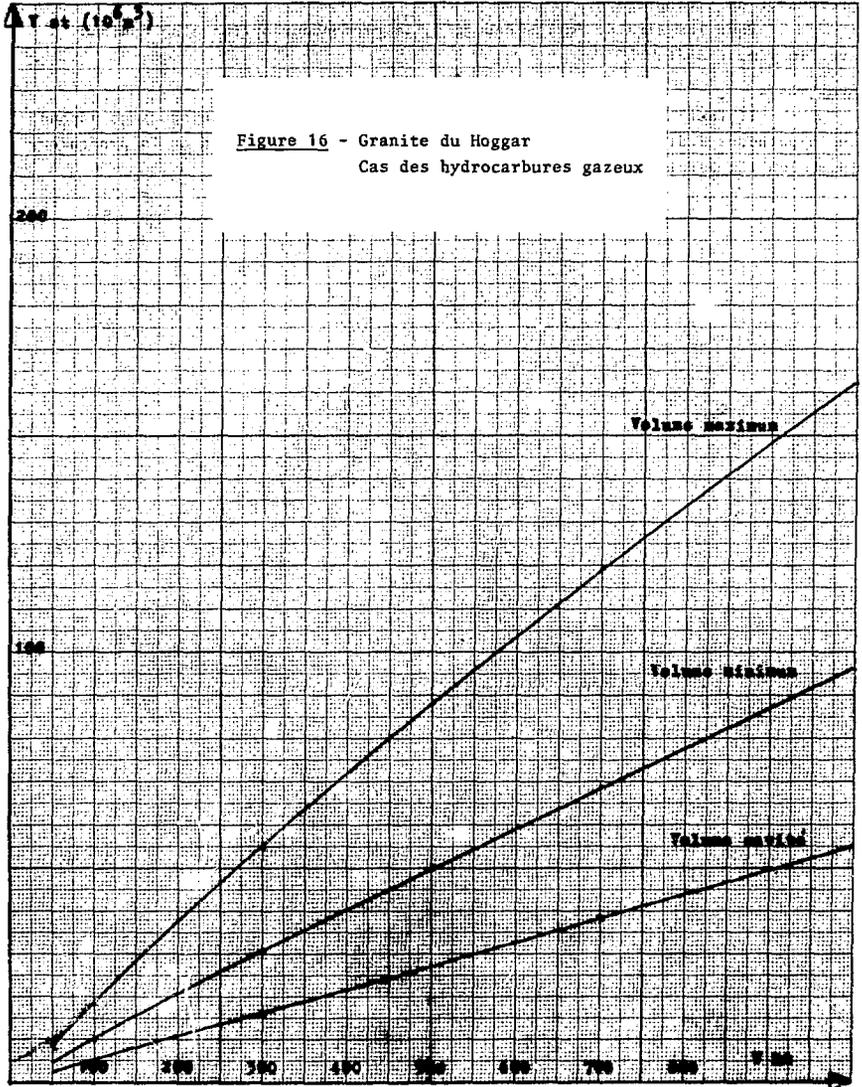
Nous avons étudié l'influence de la profondeur sur le volume stockable pour des explosions nucléaires de même énergie dans le même milieu.

Les courbes montrent que le volume de stockage est maximal pour une profondeur donnée. Cette profondeur optimale est indépendante de l'énergie de l'explosion. Elle se situe :

- vers 950 m pour le volume de stockage de la cavité
- vers 900 m pour le volume de stockage minimal
- vers 800 m pour le volume de stockage maximal.

Figure 15





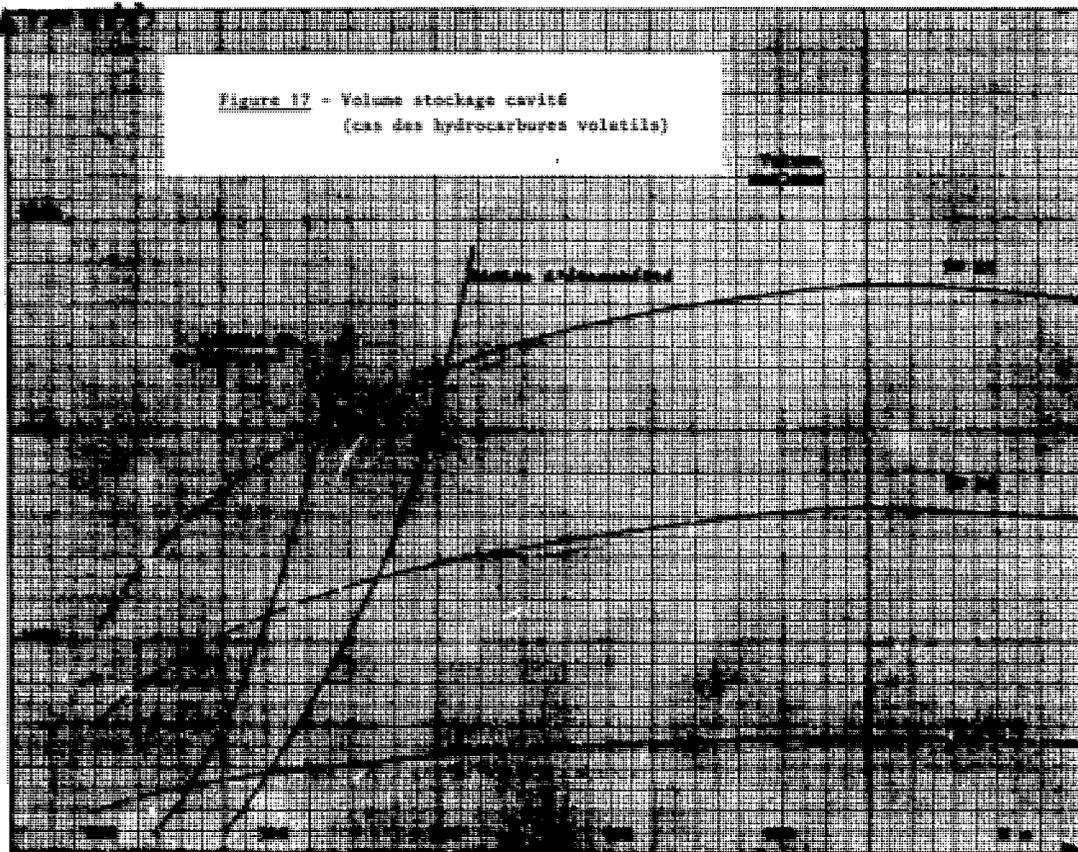
Les différents résultats ont été portés sur les figures 17, 18 et 19.
Pour une énergie donnée, pour un milieu déterminé, il existe donc une profondeur de tir optimale.

Pour les tirs de fortes énergies, la profondeur optimale se confond avec la limite d'étanchéité.

Remarque :

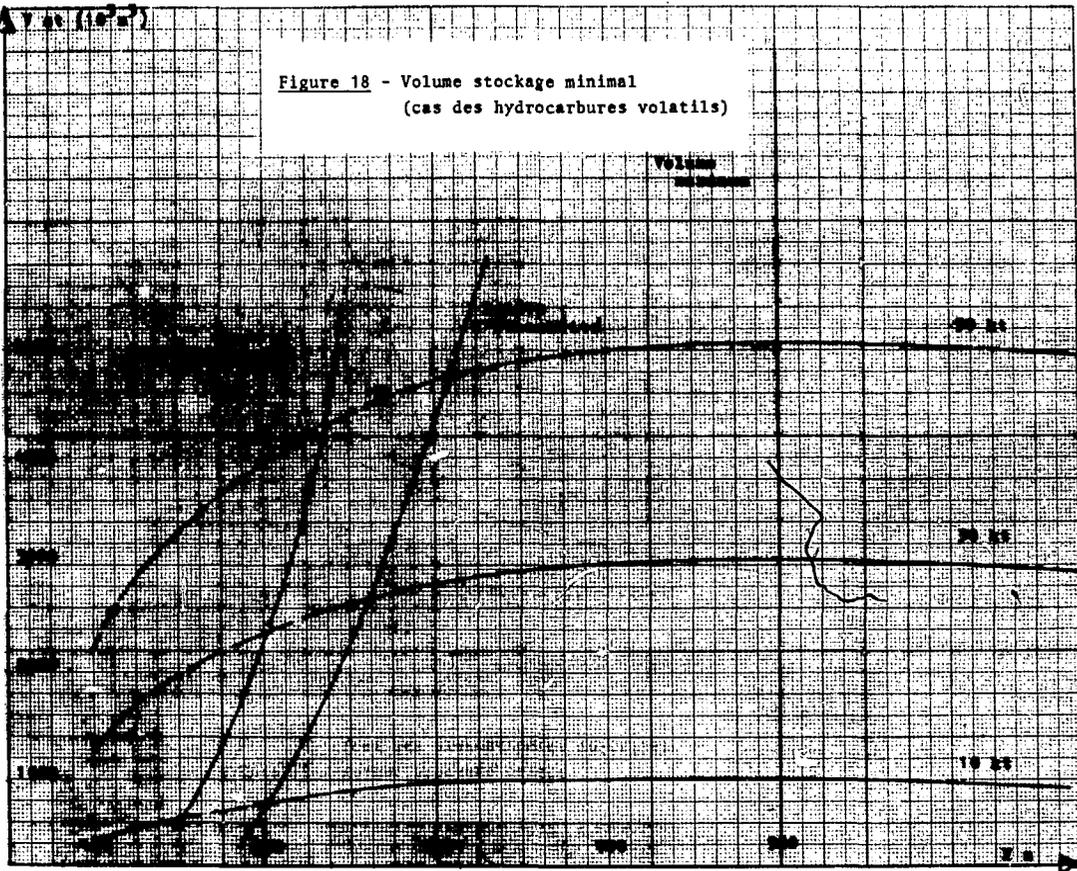
Il faut noter, cependant, que la profondeur optimale de stockage dépend des hypothèses faites sur la refermeture des fractures par action de la profondeur (pression lithostatique).

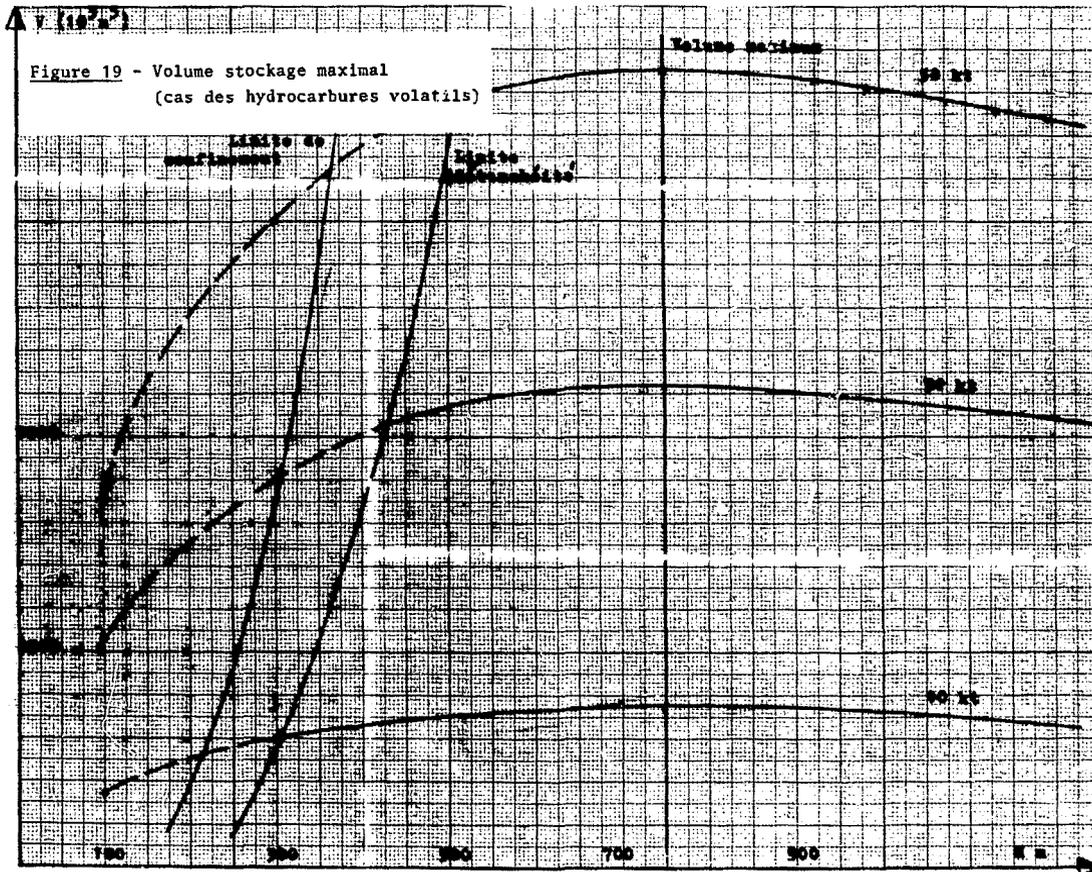
Figure 17 - Volume stockage cavité
(cas des hydrocarbures volatils)



$\Delta Y_{vol} (10^3 m^3)$

Figure 18 - Volume stockage minimal
(cas des hydrocarbures volatils)





VIII - APPLICATION AU STOCKAGE OFF SHORE

Le programme de calcul précédent a été modifié pour être appliqué au problème particulier de stockage off shore. Tous les milieux peuvent être envisagés. Cependant, comme précédemment, nous supposons que le tir a lieu dans un milieu de même nature que le granite du Hoggar, milieu pour lequel nous possédons le plus de données. Ce milieu est surmonté de deux nouveaux milieux : l'eau de mer et les sédiments.

Le principe général du calcul du volume de stockage reste le même. Les modifications portent sur le calcul du rayon de cavité, sur la définition de la loi de porosité, et sur le calcul de la pression lithostatique.

Nous envisagerons deux types de stockage off shore : l'un situé au niveau du plateau continental, l'autre au niveau des grands fonds.

Les figures 20 et 21 donnent une configuration du sous-sol marin dans ces deux cas.

Les trois milieux à considérer sont :

- l'eau de mer = épaisseur a
- les sédiments = épaisseur b
- La zone de tir = épaisseur H.

La formule donnant le rayon de cavité [8] s'écrit :

$$R_c = 52 \frac{\alpha W^{1/3}}{[\sum (\varepsilon_i \rho_i h_i) + C_{s1}]^{1/3} \gamma^i}$$

avec : $i = 1, 2, 3$ ($h_i = a, b, H$)

$\alpha = 1$ pour les tirs en puits.

Dans cette formule, C_s [8] caractérise la structure du milieu considéré. Cette valeur dépend de la résistance à la traction des terrains de couverture, des possibles stratifications du milieu, éventuellement des précontraintes naturelles d'origine tectoniques. La valeur de la contrainte de structure, pour le granite du Hoggar, est prise égale à 220.

On a pris, à titre d'exemple :

plateau continental	$\left\{ \begin{array}{l} a = 100 \text{ m} \\ b = 120 \text{ m} \\ H = 140 W^{1/3} \end{array} \right.$
niveau des grands fonds	$\left\{ \begin{array}{l} a = 2000 \text{ m} \\ b = 400 \text{ m} \\ H = 140 W^{1/3} \end{array} \right.$

Les valeurs de porosité des différentes zones pour le granite du Hoggar sont données pour une profondeur moyenne du point d'explosion de 400 m.

La loi linéaire de variation de porosité utilisée au chapitre précédent doit être modifiée, compte tenu de l'introduction des deux nouveaux milieux.

a) - Niveau du plateau continental

L'eau de mer et les sédiments sont équivalents à une couche de granite d'environ 100 mètres d'épaisseur.

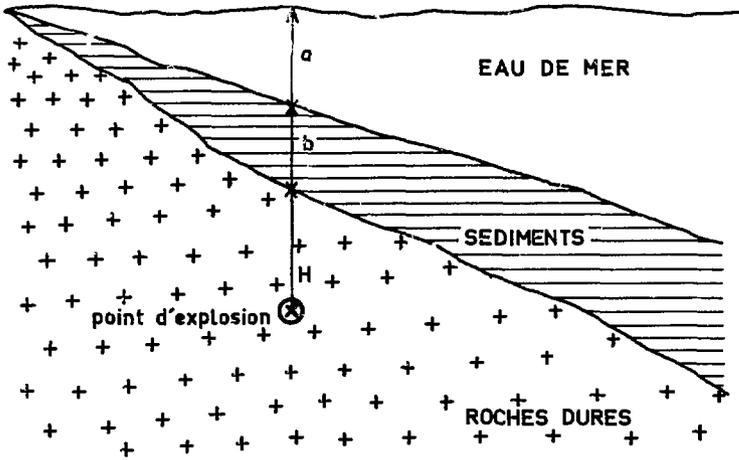


Figure 20 - Stockage au niveau du plateau continental

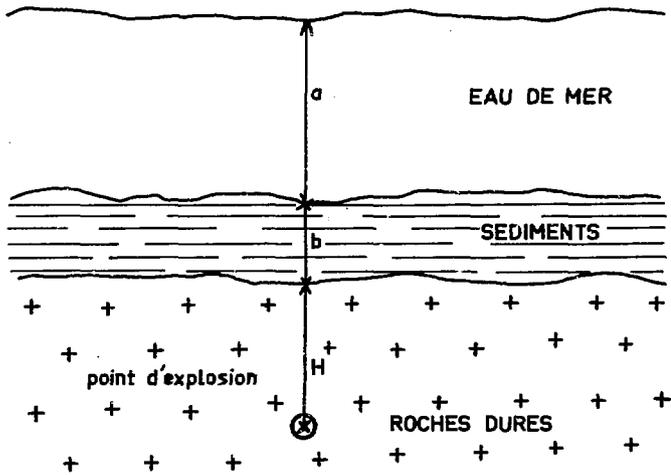


Figure 21 - Stockage au niveau des grands fonds

Les conditions aux limites pour la porosité deviennent donc :

- porosité donnée à 300 m
- porosité nulle à 3000 m.

b) - Niveau des grands fonds

Compte tenu de l'épaisseur des différentes couches, on attribue une porosité nulle aux différentes zones altérées.

Calcul du volume utilisable

On applique la méthode du chapitre V pour calculer le volume utilisable (en m^3).

a) - Niveau du plateau continental

1° - Cheminée

$$V_{MAX} = 3,46 R_C^3$$

$$V_{MIN} = 3,11 R_C^3$$

2° - Zone broyée

$$V_{MAX} = (-0,270 \cdot 10^{-3} h + 0,810) R_C^3$$

$$V_{MIN} = (-0,219 \cdot 10^{-3} h + 0,657) R_C^3$$

3° - Zone fracturée

$$V_{MAX} = (-1,600 \cdot 10^{-3} h + 4,800) R_C^3$$

$$V_{MIN} = (-0,267 \cdot 10^{-3} h + 0,801) R_C^3$$

4° - Zone à contraintes résiduelles

$$V_{MAX} = (-0,644 \cdot 10^{-3} h + 1,932) R_C^3$$

$$V_{MIN} = (-0,367 \cdot 10^{-3} h + 1,101) R_C^3$$

5° - Volume total utilisable

$$V_{MAX} = (-2,524 \cdot 10^{-3} h + 11,002) R_C^3$$

$$V_{MIN} = (-0,853 \cdot 10^{-3} h + 5,669) R_C^3$$

b) - Niveau des grands fonds

Seule la cheminée possède une porosité non nulle, nous obtenons donc :

$$V_{MAX} = 3,46 R_C^3$$

$$V_{MIN} = 3,11 R_C^3$$

Volume de stockage

Nous gardons les mêmes conditions en ce qui concerne la température qui règne au point d'explosion. En conséquence, seule la valeur de la pression lithostatique est modifiée et devient : $P_p = g(a + b \rho_2 + \rho_3 H)$.

Les figures 22 et 23 résument le principe du calcul du volume de stockage au niveau du plateau continental et au niveau des grands fonds.

Nous avons porté sur les figures 24, 25 les résultats concernant les hydrocarbures liquides et sur les figures 26, 27 ceux des hydrocarbures volatils.

Observation

Le stockage des hydrocarbures dans les vides créés par des explosions nucléaires souterraines pourrait jouer un rôle important dans le cadre de l'exploitation du pétrole et du gaz, contenus dans le sous-sol du plateau continental, par des unités enfouies dans le sous-sol marin [9].

On pourrait créer de vastes réservoirs au-dessous de l'unité d'exploitation où le pétrole serait emmagasiné pour être restitué ensuite aux grands pétroliers. Il faut cependant s'assurer que l'onde de choc produite par l'explosion ne provoque aucun gros dégât dans les galeries de travail. Si le réservoir est réalisé dans un milieu de type granitique, la profondeur minimale du point de tir sous l'unité doit être de l'ordre de $110 W^{1/3}$. Pour éviter tous risques de fuite on aura intérêt à se placer à une distance de $140 W^{1/3}$ m [10]. Une telle unité d'exploitation a été représentée figure 28.

On peut utiliser des charges uniques jusqu'à 100 kt. Cependant, il peut être plus intéressant de procéder à une série d'explosions de faibles énergies. Cette technique n'entraînera pas un gain appréciable du volume de stockage (dû à une plus grande étendue de la zone fracturée) en raison de l'augmentation du prix de l'explosif. Elle aurait surtout le gros avantage de réduire considérablement la zone de dégâts.

Figure 22 - Stockage off shore : Plateau continental

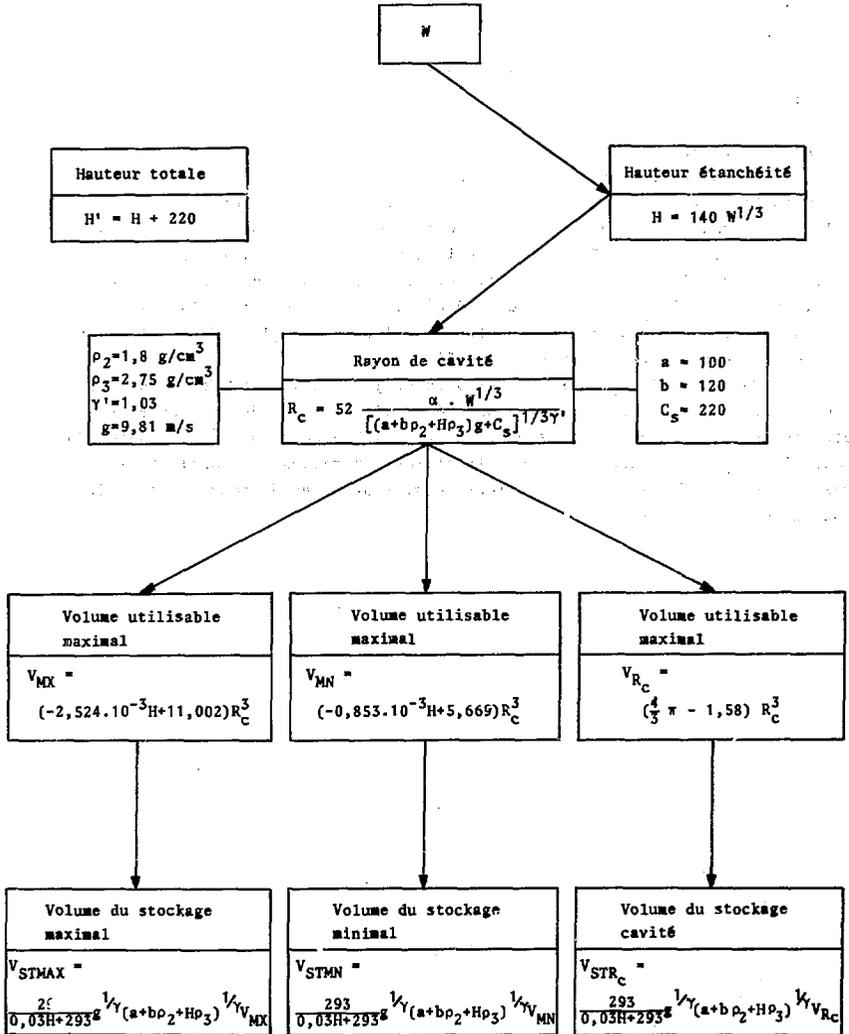
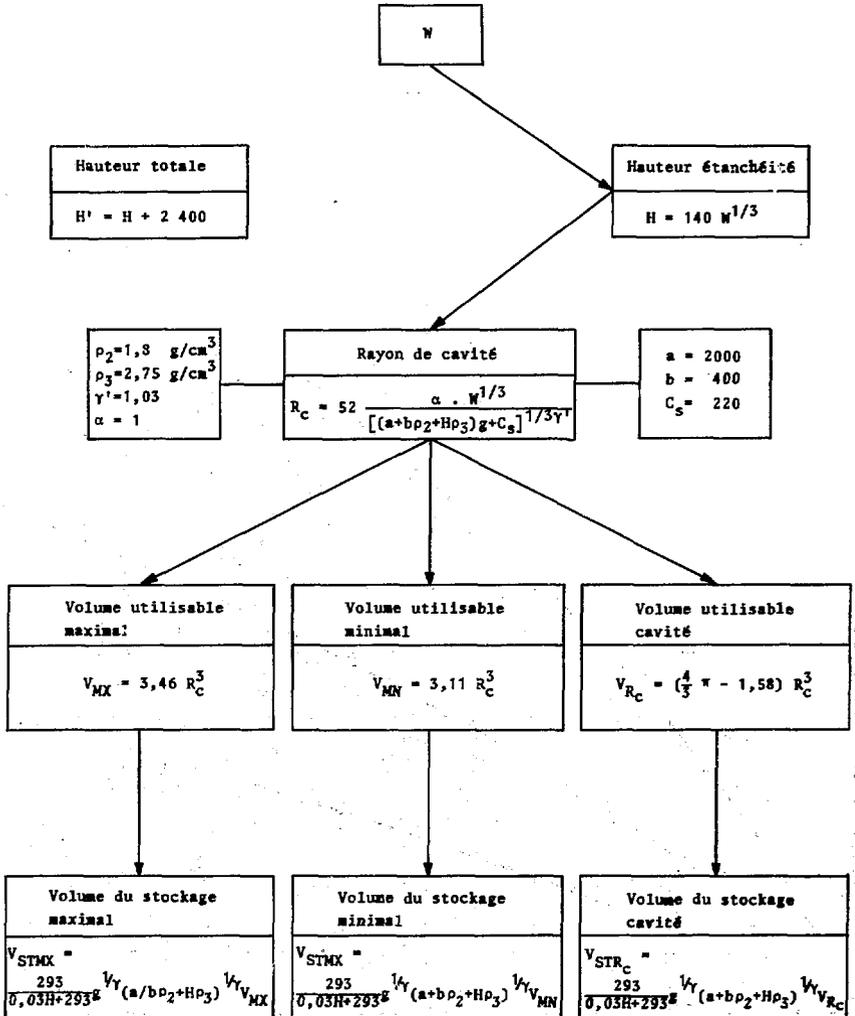


Figure 23 - Stockage off shore : grands fonds



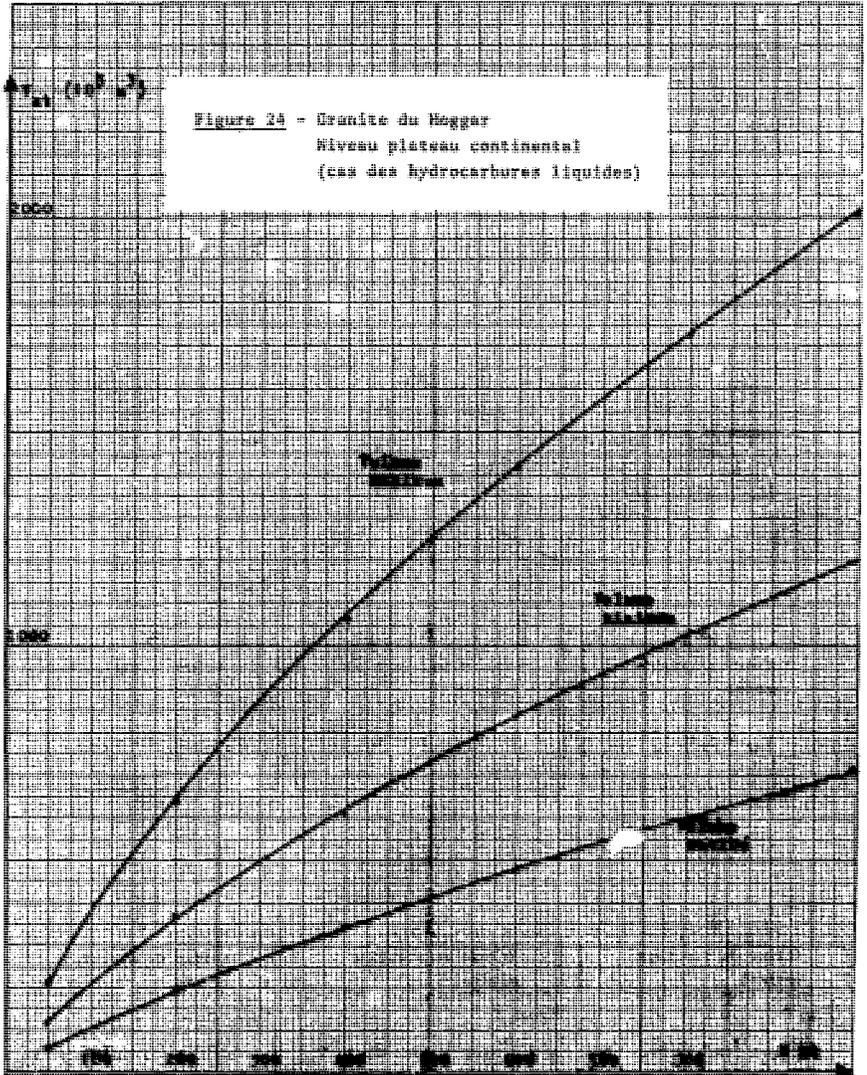
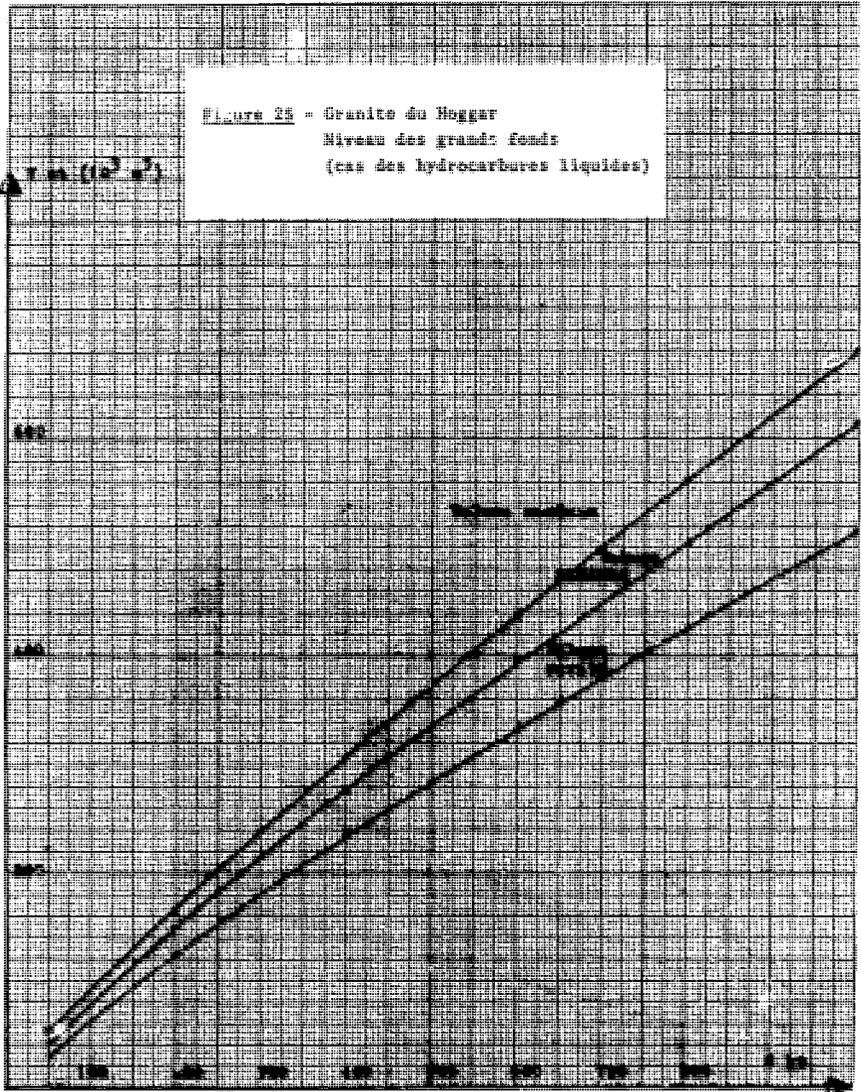
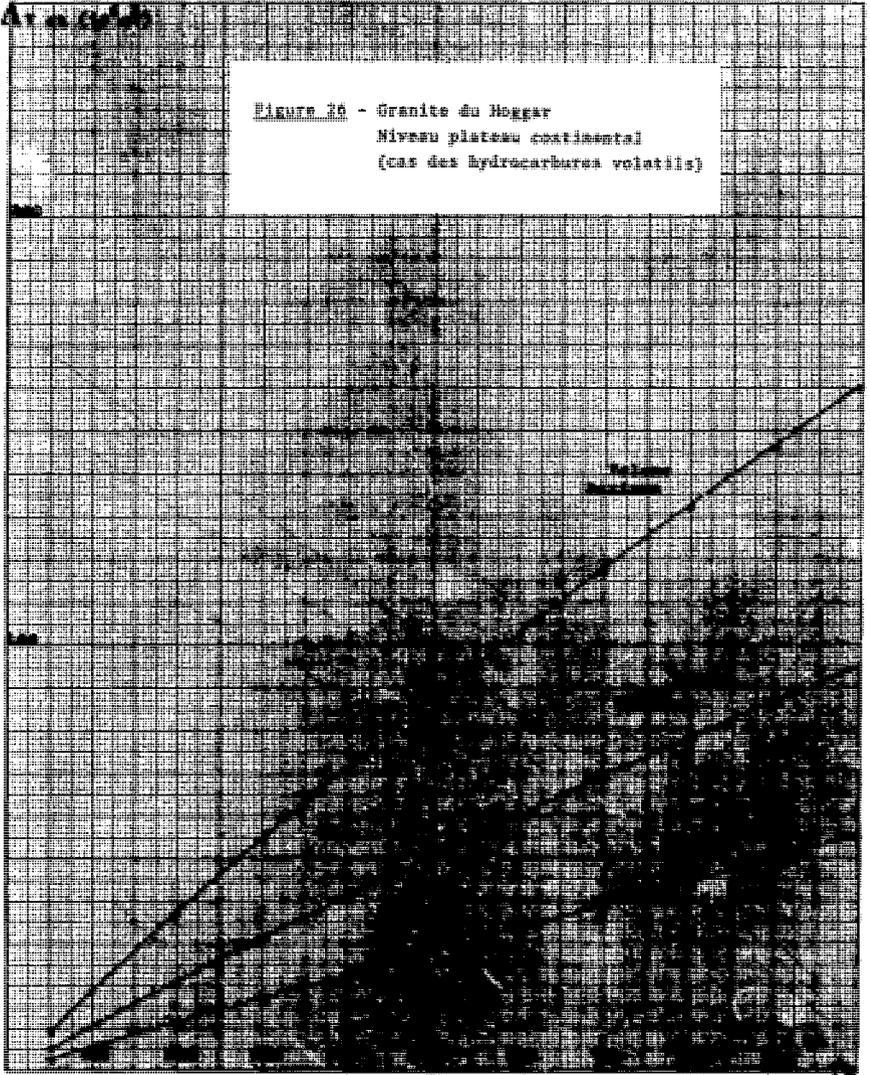


Figure 25 - Granite du Hoggar
Niveau des grands fonds
(cas des hydrocarbures liquides)

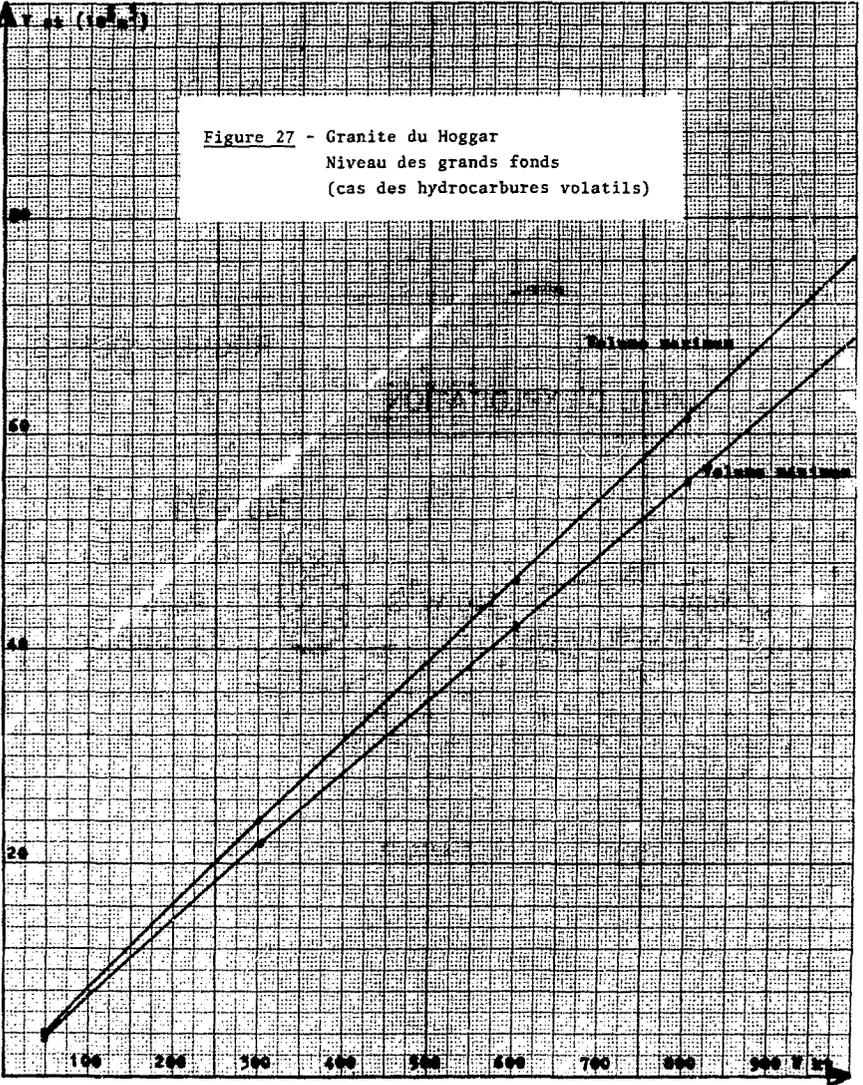


L



Ar 43 (1973)

Figure 27 - Granite du Hoggar
Niveau des grands fonds
(cas des hydrocarbures volatils)



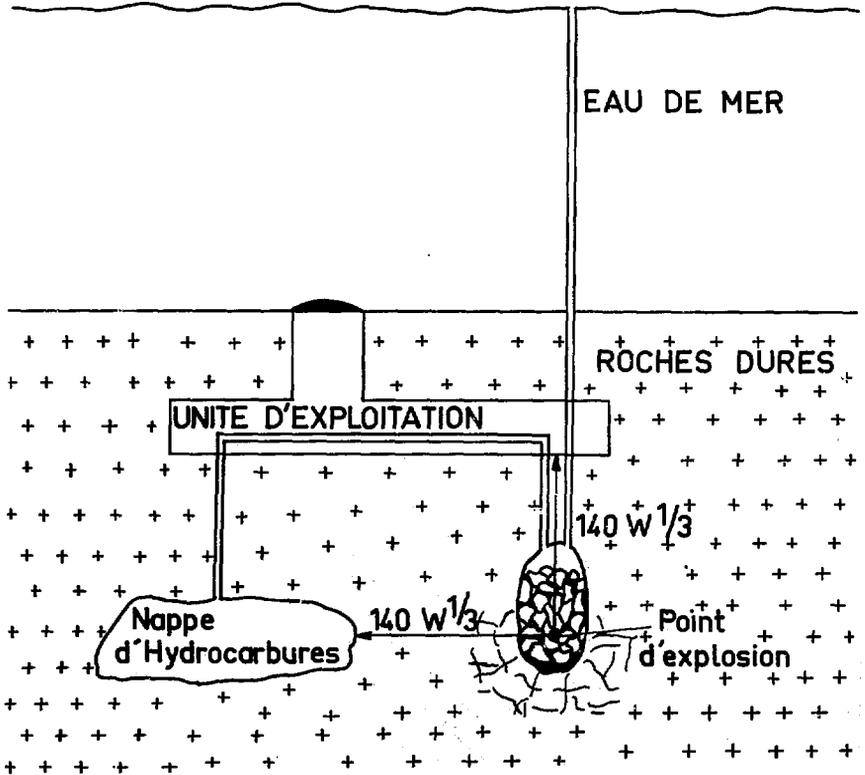


Figure 28

IX - CONCLUSION

Le volume de stockage créé par une explosion nucléaire souterraine contenue dépend de nombreux paramètres :

- certains liés au milieu où se produit l'explosion,
- d'autres liés aux explosions elles-mêmes et aux caractéristiques du gaz stocké.

On a mis en évidence l'influence particulière de deux paramètres : l'énergie de l'explosion et la profondeur du tir.

Une étude plus détaillée des autres paramètres conduirait à améliorer les prévisions sur le volume de stockage.

On a souligné tout particulièrement la possibilité de stocker dans les vides de la cheminée, mais aussi dans les zones fracturées dont la porosité a été accrue par les explosions.

Les résultats que nous avons donnés dans les chapitres précédents sont calculés à partir des effets observés lors des explosions nucléaires souterraines contenues dans le granite du Hoggar.

Pour une gamme d'énergie allant de 50 kt à 1000 kt, le volume des réservoirs créés peut aller de 150 000 à 1 500 000 mètres cubes à vide, et de 7 à 130 millions de mètres cubes en charge (cas des gaz, granite du Hoggar).

La capacité des citernes de stockage en surface varie entre 10 000 et 10 000 mètres cubes, ce qui correspond au 1/10 de capacité des réservoirs nucléaires.

Les réservoirs souterrains, créés par dissolution ou situés dans des gisements d'hydrocarbures épuisés, atteignent de leur côté des capacités de l'ordre de 500 millions de mètres cubes.

L'exploit nucléaire peut donc trouver une place entre le stockage de surface, de capacité faible, et le stockage souterrain lorsque les sites naturels disponibles (dômes de sel) sont trop éloignés des centres de consommation.

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This ensures transparency and allows for easy verification of the data.

In the second section, the author outlines the various methods used to collect and analyze the data. This includes both manual and automated processes. The goal is to ensure that the data is as accurate and reliable as possible.

The third part of the document provides a detailed breakdown of the results. It shows that there has been a significant increase in sales over the period covered. This is attributed to several factors, including improved marketing strategies and better customer service.

Finally, the document concludes with a series of recommendations for future actions. These include continuing to invest in marketing, improving operational efficiency, and maintaining the high standards of data accuracy that have been established.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Projet KETCH - PNE 1200 - 1967
- [2] CARLSON
The construction of underground oil storage tanks utilising nuclear explosives
(the Petroleum Engineer, Août 1959).
- [3] ROLLIN F., ROSE Y.
Essais de représentation schématique des effets géologiques d'explosions
nucléaires souterraines
Communication privée - Avril 1970
- [4] FAURE J.
Explosions nucléaires souterraines : effet sur la roche d'un massif de granite
Transformations d'ordre mécanique
Communication privée - Décembre 1968
- [5] DERLICH S.
Explosions nucléaires souterraines : étude des zones fracturées
C.E.A.-R. 3941, 1970
- [6] FAURE J.
Explosions nucléaires souterraines : Etude des transformations minéralogiques -
Résultats du champ de tir saharien
C.E.A. R. 3990, 1970
- [7] BOARDMAN
Macrodeformation resulting from the Salmon event
U.C.R.L. 14 280, 1965
- [8] MICHAUD L.
Explosions nucléaires souterraines
Etudes des rayons de cavité
C.E.A. R. 3594, 1968

- [9] AUSTIN
Undersea drilling and production sites for petroleum
(Jl of Petrol - Tech., oct. 1967)
- [10] GUERRINI C., GARNIER J.L.
Mouvement matériel du milieu environnant une explosion nucléaire souterraine
C.E.A. R. 3885, 1969

Manuscrit reçu le 1 septembre 1970