

EUR 7.f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE

UTILISATION DES EXPLOSIONS NUCLEAIRES
A DES TRAVAUX DE GENIE CIVIL
(EXCAVATIONS ET TERRASSEMENTS)

PAR P. HERRINCK

MAI 1962



Rapport du contrat n° 001/61/3/DMNB

AVERTISSEMENT

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission de la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique (Euratom).

Il est précisé que la Commission d'Euratom, ses co-contractants ou toute personne agissant en leur nom :

- 1° — Ne garantissent pas l'exactitude ou le caractère complet des informations contenues dans ce document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconque décrits dans le présent document ne portent pas atteinte à des droits privés.
- 2° — N'assument aucune responsabilité pour les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou procédés divulgués dans le présent document.

Ce rapport est vendu au prix de 30 francs belges, sur demande adressée à : PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES — 98, chaussée de Charleroi, Bruxelles 6.

Le paiement se fait par versement :

- à la BANQUE DE LA SOCIETE GENERALE (Agence Ma Campagne) compte N° 964.558,
- à la BELGIAN AMERICAN BANK and TRUST COMPANY — New York — compte N° 121.86,
- à la LLOYDS BANK (Foreign) Ltd. — 10 Moorgate — London E.C.2,

en mentionnant la référence : « EUR 7.f — Utilisation des explosions nucléaires à des travaux de génie civil ».

EUR 7.f

UTILISATION DES EXPLOSIONS NUCLEAIRES A DES TRAVAUX DE GENIE CIVIL - par Dr P. Herrinck.

Communauté Européenne de l'Energie Atomique - EURATOM, Bruxelles.
Rapport du Contrat n° 001/61/3 - DMN B.

Bruxelles, Mars 1962 - 26 pages.

Après avoir donné quelques informations sur le prix des engins nucléaires et sur les expériences américaines et russes en ce qui concerne les excavations réalisées au moyen d'explosifs chimiques et nucléaires, l'état actuel des connaissances technologiques en la matière est brièvement examiné.

Le problème des retombées radioactives est abordé ensuite car il constitue un obstacle majeur à un emploi généralisé de cette technique.

Ce rapport se termine par l'exposé d'une méthode d'utilisation d'explosions nucléaires qui serait peut-être susceptible de produire des excavations en évitant l'inconvénient des retombées radioactives.

EUR 7.f

NUCLEAR EXPLOSIONS APPLIED TO CIVIL ENGINEERING WORK
by Dr P. Herrinck.

European Atomic Energy Community — EURATOM — Brussels.
Report on Contract n° 001/61/3 — DMN B.

Brussels, March 1962 — pages 26.

Information on the cost of nuclear devices and of American and Russian experimental excavations produced by nuclear and chemical explosions is given. The present state of technological knowledge in this field is then briefly reviewed.

The problem of nuclear fall-out is examined as it constitutes a major obstacle to the use of this technique.

The report ends with the proposal of a method by means of which the use of nuclear explosions could perhaps produce excavations without radioactive fall-out.

EUR 7.f

NUCLEAR EXPLOSIONS APPLIED TO CIVIL ENGINEERING WORK
by Dr P. Herrinck.

European Atomic Energy Community — EURATOM — Brussels.
Report on Contract n° 001/61/3 — DMN B.

Brussels, March 1962 — pages 26.

Information on the cost of nuclear devices and of American and Russian experimental excavations produced by nuclear and chemical explosions is given. The present state of technological knowledge in this field is then briefly reviewed.

The problem of nuclear fall-out is examined as it constitutes a major obstacle to the use of this technique.

The report ends with the proposal of a method by means of which the use of nuclear explosions could perhaps produce excavations without radioactive fall-out.

EUR 7.f

NUCLEAR EXPLOSIONS APPLIED TO CIVIL ENGINEERING WORK
by Dr P. Herrinck.

European Atomic Energy Community — EURATOM — Brussels.
Report on Contract n° 001/61/3 — DMN B.

Brussels, March 1962 — pages 26.

Information on the cost of nuclear devices and of American and Russian experimental excavations produced by nuclear and chemical explosions is given. The present state of technological knowledge in this field is then briefly reviewed.

The problem of nuclear fall-out is examined as it constitutes a major obstacle to the use of this technique.

The report ends with the proposal of a method by means of which the use of nuclear explosions could perhaps produce excavations without radioactive fall-out.

EUR 7.f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE

UTILISATION DES EXPLOSIONS NUCLEAIRES
A DES TRAVAUX DE GENIE CIVIL
(EXCAVATIONS ET TERRASSEMENTS)

PAR P. HERRINCK

MAI 1962



Rapport du contrat n° 001/61/3/DMNB

TABLE DES MATIERES

1 — Introduction	5
2 — Dimension des charges nucléaires explosives	6
3 — Coût des engins nucléaires	7
4 — Explosions chimiques de grandes puissances réalisées par les Russes	8
5 — Expérience américaine dans la formation de cratères par explosifs chimiques	9
6 — Données relatives aux explosions nucléaires	12
7 — Données tirées de l'expérience militaire	13
8 — Projets américains d'excavations	14
9 — Ondes acoustiques se propageant dans l'air	15
10 — Contaminations radioactives	15
10.1 — <i>Retombées radioactives</i>	15
10.2 — <i>Radioactivité induite</i>	18
10.3 — <i>Radioactivité due aux produits de fission</i>	18
10.4 — <i>Prédictions de l'aire de contamination</i>	20
11 — Considérations générales	20
12 — Proposition d'une méthode nouvelle d'excavation au moyen d'explosions nucléaires	22
Bibliographie	24

UTILISATION DES EXPLOSIONS NUCLEAIRES A DES TRAVAUX DE GENIE CIVIL (EXCAVATIONS ET TERRASSEMENTS)

RESUME

Après avoir donné quelques informations sur le prix des engins nucléaires et sur les expériences américaines et russes en ce qui concerne les excavations réalisées au moyen d'explosifs chimiques et nucléaires, l'état actuel des connaissances technologiques en la matière est brièvement examiné. Le problème des retombées radioactives est abordé ensuite car il constitue un obstacle majeur à un emploi généralisé de cette technique.

Ce rapport se termine par l'exposé d'une méthode d'utilisation d'explosions nucléaires qui serait peut-être susceptible de produire des excavations en évitant l'inconvénient des retombées radioactives.

SUMMARY

Information on the cost of nuclear devices and of American and Russian experimental excavations produced by nuclear and chemical explosions is given. The present state of technological knowledge in this field is then briefly reviewed. The problem of nuclear fall-out is examined as it constitutes a major obstacle to the use of this technique.

The report ends with the proposal of a method by means of which the use of nuclear explosions could perhaps produce excavations without radioactive fall-out.

1 — INTRODUCTION

Les travaux d'excavation et de terrassement deviennent pénibles et coûteux quand le milieu où ils sont réalisés se présente sous la forme de roches dures. Les moyens mécaniques habituels doivent être suppléés par l'emploi d'explosifs destinés à briser la roche pour la rendre maniable et transportable. On utilise alors les propriétés brisantes de petites explosions localisées permettant de travailler par front de taille.

Depuis quelques années, les Russes surtout, ont réalisé des travaux de grande envergure en faisant appel à des explosions chimiques de très grande puissance. Cela permet non seulement de briser la roche mais de voir celle-ci déplacée par la violence du souffle de la déflagration, réduisant ainsi considérablement les travaux de déblaiement.

Ce genre d'explosion présente l'inconvénient de nécessiter l'aménagement de chambres souterraines de grande dimension pour pouvoir y loger la quantité nécessaire d'explosif. Elle a l'avantage de ne pas poser de problème de contamination radioactive et peut de ce fait être utilisée moyennant certaines précautions dans des lieux habités.

On a songé à remplacer l'explosif chimique par une réaction nucléaire explosive pour des réalisations de grande amplitude. Deux facteurs sont favorables à cette substitution, d'une part le très faible volume occupé par la charge, ce qui limite considérablement les travaux préliminaires d'aménagement et d'autre part le coût relatif d'autant moins élevé que la puissance mise en jeu est grande.

Le très grand obstacle à l'emploi de réactions nucléaires résulte de la contamination radioactive par les retombées, ce qui en limite l'utilisation non seulement à des régions inhabitées mais aussi à des cas exceptionnels. On ne conçoit pas que l'on puisse avec les processus actuels réaliser par an à la surface du globe, plus d'un petit nombre de telles explosions. La contamination a été un peu réduite par l'emploi de bombes de grande puissance utilisant 5 % de produits fissionables contre 95 % de produits fusionnables. Mais la radioactivité induite par l'action des neutrons sur les éléments contenus dans le sol constitue un danger qu'il est très difficile de réduire d'une manière substantielle avec la technique utilisée jusqu'à présent.

Nous avons imaginé une technique nouvelle d'emploi des explosions nucléaires qui selon nous, serait susceptible de réaliser des excavations sans *qu'aucune* radioactivité ne soit transférée dans l'atmosphère. Les idées relatives à cette méthode sont exposées sommairement dans le dernier chapitre de cette étude consacrée surtout à un examen critique de la littérature.

3 — DIMENSION DES CHARGES NUCLEAIRES EXPLOSIVES

L'Atomic Energy Commission des Etats-Unis a publié certaines informations au sujet des dimensions des engins nucléaires.

Le tableau suivant résume ces données :

Domaine de Puissance	Réaction	Diamètre
Quelques kilotonnes	fission	76 cm.
Quelques dizaines de kilotonnes	fission	76 cm.
Plusieurs mégatonnes	5 % fission 95 % fusion	153 cm.

D'après l'encyclopédie russe : (Bol'skaya Sovetskaya Entsiklopediya Vol. 35, 1955, p. 355) le calibre des obus nucléaires américains est de 280 mm. et le poids de l'engin d'environ 360 kg. L'auteur russe G. I. Pokrovskiy dans un article intitulé « On the use of nuclear Explosives for industrial purposes » (Gornyi Zhurnal Vol. 1, n° 5 1956, pp. 29-32) en déduit qu'une charge de 14 KT de TNT équivalent ne doit pas dépasser 250 mm. et avoir un poids de 100 à 200 kg.

3 — COUT DES ENGIN NUCLEAIRES

L'élément primordial dans l'emploi des explosions nucléaires est le coût de l'opération.

L'Atomic Energy Commission a publié le prix de réalisation d'explosions nucléaires.

Il comporte :

- 1) les frais de fabrication de l'engin ;
- 2) la pose de celui-ci à l'emplacement choisi ;
- 3) la détonation ;
- 4) les études nécessaires pour assurer la sauvegarde de la santé publique et la sécurité.

Il ne comporte pas les frais de préparation de la chambre de détonation ni ceux des études destinées à déterminer l'utilité industrielle.

Le tableau suivant résume les données :

Domaine de Puissance	Coût en dollars
Quelques kilotonnes	0,50.10 ⁶
Quelques dizaines de kilotonnes	0,75.10 ⁶
Plusieurs mégatonnes	1,00.10 ⁶

Ces prix pourraient être réduits d'une manière substantielle dans le cas où plusieurs explosions devraient être réalisées en un même site ou si un grand nombre d'engins devaient être mis en construction.

En première approximation le prix d'un engin nucléaire peut être exprimé par la relation suivante :

$$C = 0,45 + 0,16 \log. W$$

où C est exprimé en millions de dollars ;

W est la puissance de l'engin en kilotonne équivalent de TNT.

Par contre le prix de l'explosif chimique est proportionnel à la charge. Il en résulte qu'à partir d'une certaine puissance, l'explosion nucléaire devient plus avantageuse. Pour fixer les idées, remarquons qu'une explosion de 1 KT représentant une libération d'énergie de 10¹² calories gramme est susceptible d'excaver un volume d'approximativement 84.000 m³, ce qui représente environ 6 \$ le m³. Avec une explosion de 1 mégatonne le prix au m³ est réduit à environ un centième de dollar.

Or, le prix d'excavation par les méthodes classiques est aux E.-U. de l'ordre de 0,5 à plusieurs dollars au m³. On voit que le prix de revient de l'emploi des explosions nucléaires devient compétitif à partir de puissances de l'ordre de quelques kilotonnes.

Avec le progrès de la technique il est probable en outre que le coût des engins nucléaires diminuera dans les années à venir.

La plus grosse économie est réalisée dans les travaux de préparation. Ainsi une charge d'explosifs chimiques de 15.000 tonnes de TNT placée à 150 mètres de profondeur va nécessiter outre la voie d'accès, le creusement d'une chambre de 15 mille mètres cubes. Une telle opération demandera de 8 à 12 mois de travaux. G. I. Pokrovskiy estime le coût à 300.000 roubles pour le puits et à $7,5 \cdot 10^6$ roubles pour la chambre.

Dans le cas d'une explosion nucléaire il suffit d'un simple forage réalisable en un ou deux mois et dont le coût est estimé à 50.000 roubles, négligeable devant le coût de l'explosif. Celui-ci est évalué à $30 \cdot 10^6$ roubles pour l'explosif chimique et l'opération complète coûterait dans ce cas un total de l'ordre de $40 \cdot 10^6$ roubles.

L'auteur russe estime, sans donner de chiffres, que l'explosif nucléaire serait moins onéreux que l'explosif chimique pour cette puissance.

Le rendement optimum des explosions nucléaires sera obtenu pour des travaux dont les dimensions sont compatibles avec la géométrie des cratères formés. Quand le rapport entre la largeur et la profondeur de l'ouvrage est différent de celui d'un cratère ou d'une série ordonnée de ceux-ci, la perte en rendement devient considérable.

Dans le cas d'un canal profond par exemple, pour lequel une largeur étroite serait pratiquement suffisante, l'emploi d'explosions nucléaires pour son excavation conduirait à une largeur surdimensionnée et à un volume excavé beaucoup plus considérable que ce qui est strictement nécessaire. La technique des explosions nucléaires peut être très avantageuse dans certains cas mais n'est pas susceptible, dans son état actuel, de supplanter généralement les techniques anciennes.

4 — EXPLOSIONS CHIMIQUES DE GRANDE PUISSANCE REALISEES PAR LES RUSSES

Les plus grandes explosions qui ont été réalisées dans un but pacifique ont été exécutées en Chine en 1956 par des spécialistes russes. Trois charges ont été explosées pour mettre à nu un gisement de minéraux. Aucun détail n'a été publié mais il semble que chacune des charges était concentrée en un point. La première détonée le 19 juillet 1956 avait une puissance de 1.640 tonnes, la deuxième le 16 novembre 1956 avait une puissance de 4.780 tonnes et la troisième le 31 décembre 1956 représentait 9.200 tonnes.

Ces expériences ont fourni aux Russes des éléments importants pour l'élaboration de la technologie des phénomènes à cette échelle. Une expérience complémentaire a été réalisée le 19 décembre 1957, à Taskent, avec une charge de 1.000 tonnes.

Certains résultats ont été publiés.

La charge placée à 40 mètres dans un sol argileux a formé un cratère de 50 mètres de profondeur et de 100 mètres de rayon.

L'ensemble de ces explosions ainsi qu'une série de plus petite puissance ont donné des résultats qui cadrent avec les relations de similitude approximative obtenues aux U.S.A. Une fois connues les propriétés des explosions concentrées en un point, l'expérimentation a été poursuivie pour des explosions simultanées suivant une série de points équidistants le long d'une ligne. Il s'agissait de déterminer les lois d'équidistance des charges en fonction de la profondeur de tir pour obtenir avec un rendement maximum le creusement d'un canal.

Le 25 mars 1958 à 0900 GMT dans le district de Pokrovsk Uralskii ($60^{\circ}2' N$, $59^{\circ}9' E$) 3.100 tonnes d'explosifs chimiques ont été détonées dans le but de creuser un canal de

1.150 mètres de longueur. Tout porte à croire que les charges furent placées suivant 31 trous à des profondeurs variant entre 10 et 15 mètres dans un sol rocheux et saturé d'eau. L'équidistance entre chaque charge de 100 tonnes devait être de l'ordre de 35 mètres. Le canal ainsi obtenu avait 100 mètres de largeur au niveau du sol et une profondeur de 25 m. Le volume de matière déplacée a été évalué à 750.000 mètres cubes de terre et de roches. La *Pravda* du 26 mars 1958 rapporte que l'explosion avait été réalisée à une distance de 1,5 à 2 km. d'un camp de travail et que les bâtiments de ce camp n'avaient souffert d'aucun dommage. En outre le dispositif adopté dans le placement des charges a été tel qu'aucun travail de finition n'a été nécessaire, le canal était utilisable tel que les explosions l'avaient formé.

Cette expérience était en fait la troisième d'une série de 3 explosions au même site destinées à ouvrir un canal d'une longueur totale de près de 2 km.

D'après les données américaines, des explosions de 100 tonnes auraient nécessité un espacement des charges de 24 mètres et auraient produit un canal de 48 mètres de largeur au niveau du sol et une profondeur de 13 mètres. Enfin 31 charges auraient donné un canal de 720 mètres.

Ces dimensions sont assez considérablement plus petites que celles publiées par les Russes.

L'efficacité des explosions russes est donc particulièrement élevée.

Parmi les projets soviétiques, citons d'après un article de presse du 5 mars 1960 :

- 1) deux explosions de 40.000 tonnes pour découvrir un gisement de 45 mètres d'épaisseur de charbon à une profondeur de 40 à 60 mètres en Sibérie, au Sud de Yakutia;
- 2) construction d'un barrage avec l'aide d'explosifs à Alma-Atinka au Kazakhstan, afin de protéger cette ville des avalanches. Ce barrage aura près de 100 mètres de haut et sera construit en excavant les gorges d'une rivière. On estime que 5.000 tonnes d'explosifs seront nécessaires ;
- 3) approfondissement de rivières, particulièrement en Sibérie ;
- 4) destruction de la glace sur les voies d'eau.

5 — EXPERIENCE AMERICAINE DANS LA FORMATION DE CRATERES PAR EXPLOSIFS CHIMIQUES

Pour nous rendre compte de la phénoménologie de la formation d'un cratère, imaginons que nous effectuions une explosion à la surface d'un sol sablonneux dans lequel de minces colonnes verticales ont été coloriées.

Après l'explosion, on constate en faisant une coupe à travers le cratère formé, que les colonnes coloriées sont dans une certaine mesure couchées symétriquement par rapport au centre. Il y a écrasement en profondeur et latéralement. On remarque en plus l'existence d'une couche due à une retombée de matière qui présente une épaisseur plus grande sur la lèvre du cratère. Quand la charge est enterrée, le diamètre du cratère est plus grand, la matière est écrasée plus profondément, mais la couche de matière qui retombe est plus importante, laissant ainsi un cratère ayant une profondeur apparente relativement moins contrastée.

Le diamètre et la profondeur d'un cratère se mesurent d'après le niveau original du sol, sauf dans le cas de cratères lunaires ou de météorites où le niveau supérieur de la lèvre

est utilisé. Les dimensions des cratères varient avec la qualité du sol, la profondeur de la charge explosive et sa puissance. L'expérience confirme très grossièrement ce que prédit une analyse dimensionnelle élémentaire.

- a) Pour une explosion de surface, les dimensions linéaires d'un cratère sont proportionnelles à la racine cubique de la puissance de la charge explosée.

On a :

$$\begin{aligned} D &= D_0 W^{1/3} \\ H &= H_0 W^{1/3} \end{aligned}$$

où D est le diamètre

H la profondeur

D_0 et H_0 représentent les dimensions pour une explosion correspondant à $W = 1$.

- b) Pour deux explosions effectuées à des profondeurs telles que leur rapport est égal au rapport des racines cubiques des puissances, les dimensions du cratère seront également dans le même rapport.

Si P_1 et P_2 sont respectivement les profondeurs des deux explosions et si de plus

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{W_1^{1/3}}{W_2^{1/3}}$$

alors

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{W_1^{1/3}}{W_2^{1/3}}$$

et

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{W_1^{1/3}}{W_2^{1/3}}$$

Les expressions :

$$\frac{P_1}{W_1^{1/3}} = p_1 \quad \text{et} \quad \frac{P_2}{W_2^{1/3}} = p_2$$

sont les profondeurs réduites.

Les lois ci-dessus sont donc valables si

$$p_1 = p_2$$

En principe, si on connaît la loi reliant le diamètre et la profondeur apparente du cratère en fonction de la profondeur d'explosion pour une puissance unitaire, on peut par calcul déterminer les caractéristiques du cratère pour toute autre puissance et profondeur d'explosion. Ces relations de similitude sont applicables très approximativement à des explosions dont la puissance s'étend depuis quelques grammes à plusieurs tonnes.

Il y a toutefois des raisons de penser que pour de très grandes charges ces relations cessent d'être valables, étant donné que l'énergie nécessaire pour éjecter la matière du cratère constitue une fraction croissante de l'énergie totale. Cette restriction ne prend probablement de l'importance, si elle en prend, que dans le domaine des mégatonnes. Cet effet de gravité semble apparaître dans les cratères lunaires. Etant donné les relations de similitude, on utilise généralement des grandeurs réduites dans l'analyse des résultats des explosions; on a par définition :

$$d = \frac{D}{W^{1/3}}$$

$$b = \frac{H}{W^{1/3}}$$

$$p = \frac{P}{W^{1/3}}$$

Les confrontations expérimentales par le truchement de ces relations de similitude sont assez décevantes.

Si pour une série d'explosions, on porte les résultats en fonction de la profondeur réduite de tir p , on obtient respectivement pour le diamètre et pour la profondeur du cratère un nuage de points par lesquels il est possible de faire passer une courbe. Les deux courbes ainsi obtenues ont le même caractère. Pour une profondeur de tir donnée, elles présentent une valeur optimum. Même dans les meilleures conditions les expériences américaines montrent que les dimensions du cratère ne sont pas reproductibles exactement et on obtient une dispersion de l'ordre de 25 %.

En travaillant dans un loess à fins grains et avec des charges parfaitement calibrées, cette dispersion atteint encore 10 %. En outre les courbes varient considérablement en fonction du milieu dans lequel la détonation est produite. Lampson arrive à réduire quelque peu la dispersion des courbes en introduisant la racine douzième (!) d'un paramètre caractérisant le sol.

On ignore les raisons physiques responsables de cette très grande dispersion.

Des expériences ont été réalisées avec la même philosophie pour déterminer l'écartement optimum des charges alignées. On en a déduit également une relation de similitude :

$$s = \frac{S}{W}$$

où S est l'écartement des charges ;
 s l'écartement réduit.

Quand l'écartement est relativement grand, les cratères relatifs à chaque charge forment un canal dont les bords présentent une série de points de rebroussement (cups, en anglais). Il existe un écartement, non nul, pour lequel ce phénomène ne se présente plus. Les deux rives du canal apparaissent alors sous la forme de deux lignes à peu près droites et parallèles.

L'ensemble des charges discrètes de même puissance et alignées, agissent alors comme si on avait disposé d'une seule charge allongée.

Pour des charges peu profondes, l'écartement critique est donné expérimentalement par :

$$S = P + 0,5W^{1/3}$$

ou

$$s = p + 0,5$$

Remarquons que cette relation, pas plus que les autres, n'est accompagnée d'une évaluation des erreurs.

Pour des charges plus profondes l'espacement est plus grand. Le moins qu'on puisse dire de cette doctrine est qu'elle est fort vague.

La conclusion la plus simple que l'on puisse tirer de ce qui précède est qu'il est indispensable de refaire les expériences méthodiquement ou tout au moins de revoir sans idée préconçue les données expérimentales de base si celles-ci sont disponibles, et de ne pas se laisser entraîner par les conséquences théoriques de modèles outrageusement simplifiés. Les lois de similitude me paraissent mal établies. Une explosion souterraine ne se caractérise pas uniquement par un cratère ayant un diamètre et une profondeur.

6 — DONNEES RELATIVES AUX EXPLOSIONS NUCLEAIRES

On ne dispose que de très peu de données. La plupart des expériences à faible puissance du Nevada ont été exécutées sur des tours ou en ballon et n'ont produit aucun cratère. Les expériences à grande puissance du Pacifique ont formé de grands cratères dont on ne peut pas apprendre grand chose par le fait que ceux-ci ont été modifiés par la présence d'eau et par l'effet d'une érosion rapide.

Tous les éléments dont on dispose sont résumés dans le tableau suivant :

	KT	Profondeur du foyer en pieds	Diamètre	H en pieds
Jangle Surface 1951	1,2	— 3,5	90	21
Jangle Underground	1,2	17	260	53
Teapot Ess 1955	1,2	67	292	90
Neptune	0,09	98	200	30

En ce qui concerne l'explosion Neptune, exécutée à flanc de colline, la charge a été placée dans une chambre relativement grande, si bien que les résultats de cette expérience ne sont pas directement comparables aux autres.

D'après HELVIN A. HARRISON (Excavation with nuclear explosives U C R L — 5676), en utilisant une loi de similitude en $W^{1/3}$ pour le diamètre et en $W^{1/4}$ pour la profondeur, on peut extrapoler les données des explosions chimiques pour obtenir les dimensions des cratères pour n'importe quelle explosion nucléaire.

On remarque que la loi de similitude n'est plus en $W^{1/3}$ pour la profondeur comme il ressortait des expériences chimiques.

La matière excavée par l'explosion se répand dans le voisinage immédiat du cratère. Elle forme notamment la lèvre. Plus l'explosion est profonde et plus la matière expulsée est localisée.

Le cratère d'une explosion nucléaire ou chimique se caractérise par quatre zones qui s'étendent de bas en haut suivant la succession suivante :

- a) une zone de déformation élastique ;
- b) une zone de déformation plastique (déformation permanente) ;
- c) une zone de rupture ;
- d) une zone de matériaux retombés.

Dans le cas des explosions profondes, la zone de rupture prend une proportion considérable.

Dans une explosion nucléaire, trois éléments doivent être pris en considération :

- 1) l'éclair lumineux ;
- 2) le souffle ;
- 3) les retombées radioactives.

Dès que la bombe est suffisamment enterrée, la boule de feu n'atteint plus la surface.

L'effet de souffle est d'autant plus réduit que la profondeur est grande et il en est de même des retombées radioactives.

7 — DONNEES TIREES DE L'EXPERIENCE MILITAIRE

Nous n'avons pas eu la possibilité de consulter des mémoires originaux, nous nous contentons de reproduire certaines données essentielles d'après un article de A. Wéry.

Les militaires rangent les explosions par le rapport n suivant :

$$n = \frac{D}{2P} \quad (1)$$

appelé l'indice du fourneau
où D est le diamètre de l'entonnoir réel
et P la profondeur du foyer de l'explosion.

On distingue les types suivants :

a) fourneaux ordinaires $n = 1$ alors que la profondeur de l'entonnoir apparent H est donné par :

$$H = \frac{P}{3}$$

b) fourneaux surchargés : $n > 1$;

c) fourneaux sous-chargés : $n < 1$;

d) camouflets (absence d'entonnoir, explosion contenue dans le sol)

$$n = 0$$

Pour obtenir un fourneau d'indice n donné, la charge nécessaire W en kg. est donnée par la formule empirique suivante :

$$W = b.g.P^3 . f(n) \quad (2)$$

où b est un coefficient dépendant du bourrage,

b approche de 1 pour un bourrage complet.

g est un coefficient de solidité du terrain pour un explosif donné.

g varie de 1 à 3 de la terre à l'argile compacte.

P : profondeur du foyer exprimée en mètres.

n : l'indice du fourneau.

Les Belges utilisent pour $f(n)$ l'expression suivante :

$$f(n) = 0,2 + 0,8 n^3 \quad (3)$$

D'après le Colonel Verbois (titulaire de la chaire de génie de l'Ecole Royale Militaire), cette fonction est valable pour la poudre noire mais pas pour un explosif brisant.

Des formules données on tire :

$$D = \left[\frac{10}{bg} W - 2P^3 \right]^{1/3} \quad (4)$$

pour une explosion de surface $P = 0$ ($n = \infty$)
le diamètre du cratère est proportionnel à la racine cubique de la charge.

Pour deux explosions faites à des profondeurs de foyer P_1 et P_2 pour lesquels :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{W_1^{1/3}}{W_2^{1/3}} \quad (5)$$

On trouve d'après la formule (4) :

$$\frac{P_1^3}{P_2^3} = \frac{D_1^3 - AW_1}{D_2^3 - AW_2}$$

En lui combinant la condition (5) il vient :

$$\frac{D_1^3}{D_2^3} = \frac{W_1}{W_2}$$

Il en résulte que les expériences militaires conduisent aux mêmes lois de similitude que celles données par les auteurs américains.

La formule (2) ou (4) donne apparemment plus d'informations que les lois de similitude, car elle donne la charge en fonction non seulement du diamètre D mais aussi de la profondeur du foyer d'explosion.

Malheureusement elle conduit à une diminution du cratère en fonction de la profondeur du foyer alors que l'expérience donne au contraire une augmentation.

La décroissance du diamètre du cratère n'a lieu que lorsque la profondeur a dépassé une valeur critique.

8 — PROJETS AMERICAINS D'EXCAVATION

Deux projets de grande envergure sont actuellement à l'étude : le projet Chariot, destiné à créer un canal d'aménée et un port en Alaska par cinq explosions nucléaires, trois de 20 KT. et deux de 200 KT., et la création d'un nouveau canal au travers de l'isthme de Panama.

D'après une étude de L. J. Vortman, il semble qu'actuellement le coût de la réalisation d'un nouveau canal de Panama ne représenterait que 16 % des moyens financiers à mettre en œuvre avec les procédés traditionnels d'excavation.

9 — ONDES ACOUSTIQUES SE PROPAGEANT DANS L'AIR

Les explosions nucléaires réalisées en surface ou à faible profondeur donnent naissance à une onde de pression qui se propage dans l'atmosphère avec la vitesse du son.

Quand ces ondes rencontrent des couches atmosphériques où la vitesse du son est plus élevée qu'en dessous, elles sont réfractées vers le sol.

La vitesse du son dans l'air dépend de la température et de la vitesse du vent. Elle augmente avec la température. Si près de la surface du sol l'air est plus froid qu'en altitude, il en résulte une réfraction des ondes vers le sol. Ces conditions peuvent exister en dessous de 2.000 m. d'altitude.

La présence d'ozone entre 15 et 30 km. et l'absorption des radiations ultra-violettes solaires donne lieu à une augmentation de température et à une deuxième possibilité de réfraction.

Enfin, l'ionosphère vers 100 km. donne lieu à une troisième zone de ce type.

Les réfractions en dessous de 2 km. d'altitude donnent lieu à une caustique et à une focalisation vers 15 km. en distance horizontale du lieu de l'explosion. Il se produit ensuite une réflexion à la surface du sol et une répétition du phénomène. Les ondes réfractées par la couche contenant l'ozone reviennent au sol entre 80 et 200 km. du point d'origine.

Enfin, les ondes réfractées par l'ionosphère atteignent la terre au delà de 200 km.

Les ondes réfractées par les deux premières régions peuvent donner lieu à des destructions de vitres.

Ces effets peuvent être minimisés en réalisant les explosions à des moments où les conditions météorologiques sont défavorables à leur apparition.

Les effets des ondes réfractées par l'ionosphère sont trop faibles pour pouvoir causer des dégâts.

10 — CONTAMINATIONS RADIOACTIVES

10.1. — Retombées radioactives.

Quand une bombe nucléaire explose sous le sol, une « boule de feu » prend naissance. Celle-ci est constituée de gaz à très haute température et à très haute pression. Elle contient les résidus de la bombe et une certaine quantité de terre ou de roche vaporisée. Si la détonation a lieu à faible profondeur, cette boule de feu peut être aperçue au moment où elle perce la surface du sol pour s'élever dans l'atmosphère.

Elle est ensuite enveloppée d'un nuage de débris ayant à la base une forme conique inversée (expérience du Nevada de 1951).

A plus grande profondeur, la boule de feu n'atteint plus la surface. Seuls les gaz arrivent encore à s'échapper, entraînant avec eux une grande quantité de débris.

Plus profondément encore, toute l'explosion reste confinée dans le sol, il n'y a plus alors formation de cratère.

Les débris les plus volumineux retombent dans les environs immédiats du cratère mais les particules de plus petites dimensions sont entraînées beaucoup plus haut dans l'atmosphère pour retomber progressivement.

Le vent leur communique un mouvement transversal qui a pour effet un étalement dans la direction du vent.

Comme ces particules sont recouvertes de matières radioactives, il en résulte une contamination étendue.

Les explosions à grande profondeur et à grande altitude ne donnent pas de retombées radioactives locales, les dernières distribuent leur radioactivité dans l'atmosphère et contribuent à augmenter les retombées à l'échelle mondiale.

Les explosions à faible profondeur donnent la contamination la plus considérable, du fait qu'à la radioactivité des produits de fission s'ajoute celle induite par l'action des neutrons sur les éléments contenus dans le sol.

Les plus petites particules de diamètre inférieur à environ 5 μ subissent l'action du mouvement brownien et contribuent à la radioactivité générale de l'atmosphère.

Celles de diamètre plus grand retombent localement sous l'effet combiné du vent et de la gravitation qui peut être déterminée approximativement par la loi de Stokes.

La loi de Stokes peut s'écrire :

$$\frac{db}{dt} = 0,35 d^2 \rho$$

où $\frac{db}{dt}$ est exprimé en pieds par heure,

ρ en gramme par centimètre cube,

d en microns.

Elle s'applique modérément bien pour des particules de 5 à 300 μ de diamètre.

En supposant que les particules ont la même densité que le sable, c'est-à-dire 2,6 gramme/cm³, la table suivante donne le temps nécessaire à des particules de divers diamètres pour retomber d'une altitude de 80.000 pieds.

Diamètre en μ	Temps en heures	Km. sous vent de 20 km./heure
340	0,75	15
250	1,4	28
150	3,9	78
75	16	320
33	80	1.600
16	340	6.800
8	1.400	24.000
5	3.400	68.000

En supposant un vent de 20 km./heure, la dernière colonne du tableau donne la distance parcourue horizontalement par les particules avant d'être déposées sur le sol.

On remarque que les particules de diamètre plus grand que 40 μ environ, retombent assez rapidement, tandis que celles de diamètre inférieur sont susceptibles de parcourir de très grandes distances. Les derniers chiffres du tableau perdent d'ailleurs tout sens du fait que le vent ne garde pas l'uniformité que le calcul suppose.

Pratiquement, en utilisant le régime normal des vents, il y a moyen de prédire les retombées jusqu'à 200 miles dans la direction du vent. Au delà, la prédiction devient aléatoire. Mais comme à ces distances les intensités deviennent très faibles, cela n'a plus guère d'importance.

Au moyen de données d'expérience effectuées à la surface à 16, 67 et 230 pieds/ $W^{1/3}$ de profondeur réduite, on a pu évaluer la répartition de l'activité due à une explosion.

On en a déduit le tableau suivant :

Profondeur réduite en pieds/ $W^{1/3}$	< 40 μ	> 40 μ	conservé par le sol
Surface	33 %	67 %	0
50	3 %	96 %	1 %
100	1 %	44 %	55 %
150	0	8 %	92 %
200	0	1 %	99 %

On remarque :

- 1) que la contribution à l'activité mondiale considérée ici comme due aux particules de diamètre inférieur à 40 μ diminue très vite en fonction de la profondeur ;
- 2) que la retombée locale présente un maximum pour une profondeur réduite d'explosion de l'ordre de 50 pieds/ $W^{1/3}$.

Les explosions utilisées pour des excavations sont enterrées à des profondeurs réduites plus grandes afin d'obtenir une efficacité optimum.

Ainsi dans le projet Chariot, les charges de 20 KT seront vraisemblablement posées à 350 pieds de profondeur et celles de 200 KT à près de 700 pieds. Cela donne respectivement comme profondeur réduite 130 et 120 pieds/ $W^{1/3}$, ce qui réduit les retombées à 20 % environ de l'activité totale.

On constate de plus que la distribution du nombre de particules en fonction de leur diamètre change en fonction de la profondeur de l'explosion. La dimension des particules devient plus grande quand on augmente la profondeur, ce qui a pour effet d'augmenter la localisation des retombées.

Une estimation pour le projet Chariot donne, en supposant une retombée de 17 % de l'activité totale et un vent de 20 nœuds, une ellipse allongée de 60 miles de longueur et de 10 miles de largeur, où les doses de radiation sont de l'ordre de 10 Roentgen/heure.

L'ellipse pour 1 Roentgen/heure atteint une longueur de 130 miles et pour 0.1 Roentgen/heure près de 300 miles.

10.2. — Radioactivité induite.

Les neutrons issus des réactions nucléaires produisent une radioactivité induite due à leur capture par certains éléments du sol. Citons les principaux :

- 1) Le sodium donne du sodium 24 radioactif ayant une vie moyenne de 14,8 heures et émettant des particules β et des rayons gamma d'énergie relativement grande 1,4 et 2,8 Mev, alors que l'énergie par photon des produits de fission est de 0,7 Mev ;
- 2) Le manganèse donne du manganèse 56 ayant une vie moyenne de 2,6 heures et émettant plusieurs gammas de grande énergie ainsi que des β ;
- 3) Le silicium donne du silicium 31 ayant une vie moyenne de 2,6 heures et émettant des β et une faible proportion de γ ;
- 4) L'aluminium donne de l'aluminium 28 ayant une vie moyenne de 2,3 minutes ;
- 5) Le fer et le cobalt fournissent également une contribution à la radioactivité mais dans une moindre mesure.

Certaines substances, tel le Bore, absorbent les neutrons sans devenir radioactives et tendent à diminuer l'activité induite.

Les substances radioactives résultant de la capture des neutrons dans le sol sont en général à vie courte et leur effet diminue rapidement avec le temps.

10.3. — Radioactivité due aux produits de fission.

Les produits de fission constituent un mélange complexe de quelques 200 isotopes de 35 éléments situés dans la table de Mendéléev entre le zinc et le gadolinium.

La plupart de ces isotopes sont radioactifs, émettant des particules β fréquemment accompagnées de radiations gamma. Par KT il se forme à peu près 50 grammes de produits de fission. La radioactivité des produits de fission est initialement très grande mais diminue assez rapidement au cours du temps.

Ainsi si l'activité est fixée à 100, une heure après l'explosion, on a pour les heures qui suivent les pourcentages donnés par le tableau suivant :

Temps en heure	% activité
1	100
2	42
4	19
6	11
7	10
8	8
10	6
12	4
48	1
316	0,1
2.150	0,01

Les vies moyennes des produits de fission s'étendent depuis une petite fraction de seconde à des millions d'années. Il est impraticable de représenter mathématiquement la décroissance radioactive en fonction de la demi vie de chacun des constituants du mélange. Néanmoins on a pu déterminer expérimentalement la décroissance du nombre global de désintégrations par unité de temps N_t avec une certaine précision pour des périodes allant de quelques minutes à 2 ou 3 ans.

On a :

$$N_t = N_1 t^{-1,2}$$

ou

$$\log. \frac{N_t}{N_1} = - 1,2 \log. t$$

où t est exprimé en heures.

Les données du tableau ont été calculées au moyen de cette formule.

Une équation du même type peut être utilisée pour évaluer le nombre de photons produits moyennant l'emploi d'une constante de référence N_1 appropriée, car elle varie au cours du temps. Lors de chaque désintégration, une particule β est émise mais le nombre de photons produits ne représente qu'une fraction du nombre des β . Cette fraction vaut à peu près $1/2$ mais évolue avec le temps.

Etant donné le grand pouvoir pénétrant des photons vis-à-vis des β , on néglige l'action de ces dernières dans l'évaluation des doses de radiation dues aux retombées radioactives. Si la proportion de désintégrations donnant lieu à des photons et l'énergie de ceux-ci sont considérées comme constantes dans le temps, le nombre des ions produits par unité de temps, évalué en Roentgen/heure, s'exprimerait sous la forme d'une relation directe en fonction du nombre de désintégrations par heure.

Ce n'est pas le cas. Les rayons gammas ont une énergie beaucoup plus grande au début de la décroissance radioactive que plus tard.

Néanmoins, pour des périodes d'intérêt pratique débutant quelques heures après l'explosion, l'énergie moyenne des photons gammas peut être considérée comme constante avec une valeur de 0,7 Mev.

Bien que la fraction des émetteurs gamma varie au cours du temps, on obtient une approximation satisfaisante en se servant d'une équation du type donné ci-dessus :

$$R = R_1 t^{-1,2}$$

$$\log. \frac{R}{R_1} = - 1,2 \log. t$$

où R est exprimé en Roentgen par heure.

R_1 représente le nombre de Roentgen/heure pour $t = 1$ heure.

Par intégration on obtient la dose totale T de gammas émis dans l'intervalle $t_2 - t_1$.

$$T = R_1 \int_{t_1}^{t_2} t^{-1,2} dt$$

$$T = \frac{R_1}{0,2} \left[\frac{1}{t_1^{0,2}} - \frac{1}{t_2^{0,2}} \right]$$

En principe, cette équation pourrait être utilisée pour estimer la dose totale émise par les retombées radioactives dans une zone contaminée pourvu que ces retombées aient eu lieu

dans un temps relativement court. En réalité, il n'en est pas ainsi, car les particules mettent un temps assez long pour atteindre le sol et il devient nécessaire de tenir compte de l'accroissement de la contamination au cours du temps.

Quand les retombées ont cessé, il suffit d'une mesure de R_1 pour pouvoir utiliser la relation donnée.

10.4. — Prédiction de l'aire de contamination.

Etant donné une explosion réalisée à une certaine profondeur, examinons successivement les facteurs qui doivent être connus pour pouvoir définir la structure de l'aire de contamination.

- 1) Il est nécessaire de connaître la répartition des particules en fonction de leur diamètre dans le nuage issu de l'explosion afin de pouvoir utiliser la formule de Stokes.
- 2) Le deuxième élément indispensable aux calculs est la hauteur atteinte par le nuage.
- 3) Pour pouvoir déterminer les trajectoires des particules et leur point de chute, il faut pouvoir disposer de la direction et de la vitesse du vent jusqu'à une hauteur équivalente à celle atteinte par le sommet du nuage et cela dans des tranches successives de l'atmosphère. Le vent en général ne garde ni la même vitesse ni la même direction en fonction de l'altitude.
- 4) Enfin, certaines données sur la diffusion doivent permettre une évaluation de l'extension des retombées dans une direction perpendiculaire au vent.

On manque malheureusement encore des données relatives à la distribution des particules en fonction de leur diamètre et à la hauteur atteinte par le nuage, en fonction de la profondeur du foyer et de l'énergie libérée par l'explosion. Il en résulte que toute estimation ne peut nécessairement être faite qu'au moyen d'hypothèses plus ou moins valables et que la prédiction ne pourra prétendre qu'à une approximation grossière.

11 — CONDITIONS GENERALES

Tant que nos connaissances dans le domaine des retombées radioactives ne seront pas plus étendues, il ne sera pas possible d'évaluer les dangers d'une explosion nucléaire, suivant la technique actuelle à faible profondeur, avec une précision suffisante pour être tentée sans risques dans des régions habitées.

Les progrès techniques permettront peut-être par l'emploi d'absorbants de réduire la contamination. Cette réduction devra atteindre plusieurs ordres de grandeur avant de pouvoir envisager l'emploi de ce mode d'excavation d'une manière autre qu'exceptionnelle.

Les travaux publiés relatifs à la technologie du phénomène ne sont pas satisfaisants. Ils laissent l'impression que les explosions agissent à la façon d'une gigantesque pelle dont l'action crée les excavations.

Ce schéma grossier ne correspond pas à la réalité.

En fait, une explosion génère une onde de choc et se sont les vicissitudes de la propagation de cette onde combinée à l'action des gaz qui produisent les phénomènes observés.

C'est ainsi que l'on a constaté la formation d'un cratère lors de la réalisation d'un camouflet en profondeur par une explosion chimique. Le terrain entre la cavité et le cratère

était resté absolument intact après l'explosion. Comme l'énergie de l'onde de choc était modeste, les terres sont retombées dans le cratère, ce qui lui donnait globalement l'aspect d'un monticule de terres ameublées.

Nous tenons cette information importante du Colonel Verbois, titulaire de la chaire de génie de l'École Royale Militaire de Belgique, qui partage d'ailleurs entièrement notre point de vue quant à la physique du phénomène.

Le problème de la formation de cratères et de cavités doit donc être complètement repensé en fonction d'une base théorique convenable. La voie dans laquelle les recherches se sont engagées est empreinte d'un empirisme excessif. Elle a conduit à des formules mal coordonnées et comportant en outre des paramètres insuffisamment précisés.

Il est nécessaire de reprendre l'étude des données expérimentales et de les compléter au besoin en fixant son attention sur le mécanisme physique mis en jeu. Celui-ci doit être analysé en fonction des caractéristiques concrètes relatives à la nature de l'explosif qui peut être plus ou moins brisant, à l'énergie libérée, à la profondeur du foyer et surtout à la nature du milieu. Le comportement de ce milieu sous l'effet d'une grande pression et d'une onde de choc violente va donner lieu à des difficultés mathématiques par la présence d'effets non linéaires. On sera ainsi amené à tourner la difficulté par une expérimentation soignée où chaque paramètre devra être varié indépendamment des autres. En principe, il ne devrait pas y avoir de solution de continuité entre le cratère formé dans une feuille de verre par le choc d'une balle de revolver, par exemple, et celui d'une explosion chimique ou nucléaire, en passant par le cratère d'un météorite ou lunaire.

Les primitifs, en taillant leur silex, utilisaient déjà les propriétés d'une onde de choc pour obtenir des coups de poing, des haches, des lames et des grattoirs.

Quand on observe ces objets on y retrouve notamment des entailles coniques qui rappellent des cratères tronqués. Il y aurait un grand avantage à refaire systématiquement certaines expériences élémentaires dans des milieux simples tels les verres, certaines roches isotropes ou des matières plastiques et étudier l'effet d'une percussion.

On pourrait ensuite passer à l'étude d'explosions à une échelle réduite d'abord en utilisant des milieux bien définis puis des matières hétérogènes.

On passerait ensuite à des explosions de l'envergure de celles couramment mises en œuvre dans les carrières. Les données obtenues seraient finalement confrontées avec les résultats des explosions ayant été exécutées dans le passé et l'on tenterait sur une base sérieuse d'en extrapoler la phénoménologie aux explosions de grande puissance. Le problème commence donc par être un véritable problème de sismologie sur modèles réduits.

Nous pouvons nous poser une foule de questions susceptibles d'être étudiées par cette méthode. Quelles sont les ondes produites par une percussion et par une explosion? Quelle est la proportion d'ondes longitudinales par rapport aux ondes transversales en fonction des paramètres du milieu? Que se passe-t-il à la surface limite? Quelle est la forme des ondes produites? Peut-il se former pendant un temps très court des ondes stationnaires par rapport à une surface limite? Peut-on expliquer par ce mécanisme la fissuration d'une pièce métallique soumise à l'action d'une explosion en surface? Quelles sont les conditions d'existence et de formation des ondes supersoniques? Comment s'atténuent-elles? Il y a-t-il moyen de conjuguer l'action de deux ou plusieurs charges pour obtenir des explosions à effets dirigés? Quels effets peut-on produire par deux explosions dont l'une est légèrement en avance sur l'autre?

Certains des problèmes cités ont été étudiés mais il semble nécessaire de créer une doctrine d'ensemble. Elle mérite l'attention des physiciens et un traitement moins empirique.

L'intérêt de ces questions déborde d'ailleurs largement du cadre de la simple formation de cratères.

La mise sur pieds d'un laboratoire spécialisé serait susceptible d'aborder l'ensemble des sujets auxquels nous avons fait allusion.

Il pourrait en outre fournir des données précieuses dans d'autres domaines et notamment fournir les données expérimentales indispensables pour la mise en œuvre du procédé qui sera décrit au chapitre suivant et qui doit permettre de réaliser des excavations où toute la radioactivité reste confinée dans l'écorce terrestre.

12 — PROPOSITION D'UNE METHODE NOUVELLE D'EXCAVATION AU MOYEN D'EXPLOSIONS NUCLEAIRES

Dans le chapitre précédent nous avons cité une expérience réalisée par le génie militaire belge dont le résultat le plus important est la formation d'un cratère par une explosion entièrement confinée dans le sol. Ce cratère résulte de l'action de l'onde de choc au moment où celle-ci, issue du foyer de l'explosion, a atteint la surface après s'être propagée dans le sol.

Ce point important semble avoir échappé aux divers auteurs que nous avons consultés.

Dans la réflexion normale d'un ébranlement quelconque sur un obstacle, ici la surface limite sol-air, il y a changement de signe pour les déplacements et les vitesses et il n'y a pas de changement de signe pour les dilatations et les variations de pression. Il en résulte qu'à la surface réfléchissante les dilatations et la pression ont à chaque instant une valeur théorique double de celle qui correspond à l'ébranlement incident.

La méthode nouvelle d'excavation se base sur cette propriété et sur l'emploi de deux ou plusieurs charges que l'on fait exploser simultanément ou avec des retards tels que l'on obtienne, par une intégration des ondes de choc, un effet voulu en un endroit déterminé. Cette méthode est extrêmement versatile, car on peut non seulement combiner l'emploi de charges chimiques près de la surface avec des explosions nucléaires en profondeur mais aussi varier la disposition géométrique des charges, les temps de mise à feu et l'importance des quantités d'explosif.

Les ondes de choc étant caractérisées par une quasi discontinuité, il est probable que des ondes d'assez haute fréquence lui sont associées. Il n'est pas exclu que ces ondes puissent être réfléchies par un rideau de forages judicieusement espacés. Si cette considération devait recevoir une confirmation expérimentale, il serait possible, en disposant de tels rideaux verticaux ou même obliques de part et d'autre de l'objectif, d'obtenir une concentration des effets et par conséquent un meilleur rendement. Il est possible encore en faisant exploser des charges chimiques de délimiter le volume à excaver et d'utiliser la puissance des ondes de choc intégrées pour expulser les matériaux de ce volume. Le problème à résoudre est de déterminer l'intervalle de temps en avance ou en retard entre les explosions chimiques et les explosions nucléaires pour obtenir un effet optimum.

Enfin, il pourrait être avantageux de combiner la méthode qui vient d'être résumée avec la possibilité mise en évidence par F. B. Porzel de guider les ondes de choc par des canaux.

Inversément, il doit être possible de réduire considérablement la formation d'interférence en favorisant la pénétration de l'onde de choc dans l'atmosphère.

En surmontant d'un réseau de colonnes le site d'une explosion, on pourrait réduire l'impédance sol-air et faciliter la dispersion d'énergie. De cette manière il est peut-être possible d'éviter la destruction des cavités formées lors des explosions nucléaires.

Il pourrait en résulter une possibilité de réaliser ces cavités à des profondeurs D en mètres plus faibles que celles données par l'expression très approximative

$$D > 95 . W^{1/3}$$

qui résulte des expériences du Nevada.

L'avantage de notre méthode d'excavation se base essentiellement sur le fait que la radioactivité reste isolée à l'intérieur et sur les parois de la cavité formée par l'explosion nucléaire.

Le fait supplémentaire que 80 % des produits de fission se trouvent englobés dans la masse de rochers insoluble qui a été fondue, réduit considérablement le danger de contamination des eaux souterraines.

Les idées qui ont été exposées doivent recevoir l'appui d'une confrontation expérimentale.

Celle-ci peut être réalisée sur des modèles réduits pour commencer.

Bruxelles, le 28 mai 1961.

P. HERRINCK, Dr. Sc.

BIBLIOGRAPHIE

1. A. E. C., Blanca — A study of the maximum vertical earth motion of the mesa slope, AEC-AECV-4681.
2. A. E. C., UCRL-5676 Proceedings of the Second Plowshare Symposium May 13-15, 1959, San Francisco, California, Part II Excavation.
3. ANDERSON D. C., PORZEL F. B., Operation plumbbob close-in time of-arrival measurements for yield of underground Rainier shot, WT-1495 (1959).
4. ANDREWS Th. J., Transient Ground Mechanical Effects from HE and nuclear Explosions, Operation Jangle, AEC-WT-385.
5. ANTHONY H. V., Operation Hardtack, Phase II, Ground Motion Measurements, ITR-1704 (1959).
6. BANISTER J. R., The possibilities of reducing neutron-induced contamination of underground bursts, SCTM 385-59 (51) (1957).
7. BATZEL R. E., Radioactivity associated with underground nuclear explosions, UCRL-5623 (1959).
8. BISHOP J. A., Physical characteristics of crater and lip, Operation Jangle, AEC-WT-399.
9. BOND W. D., CARK W. E., Leaching of tamalpais debris, ORNL-2810 (1960).
10. BROWN-JOHNSON, Non-Military Uses of Nuclear Explosions, A/Conf. 15/P/2179, p. 300.
11. BROWN H., JOHNSON G. W., Non-Military uses of Nuclear Explosions, UCRL-5026 A/Conf./15/P/2179 (1958).
12. BYRON F., MURPHEY, The price of containing radioactivity in digging craters, SCTM-384-58 (51) (1958).
13. CAMPBELL D. C., Some HE tests and observations in craters and base surges, Operation Jangle, AEC-WT-410.
14. CARDER D. S., CLOUD W. K., PEARCE T. H., MURPHY L. M., Operation hardtack surface motions from a series of underground nuclear tests, ITR-1705 (1959).
15. CARDER D. S., CLOUD W. K., MURPHY L. M., HERSHBERGER J. H., Operation Plumbbob surface motions from an underground explosion, WT-1530 (1958).
16. CARLSON R. H., Minimum Yield of Nuclear Explosives required for canal excavation, AEC-SCTM-450-58 (51).
17. CLIFFORD M., BACIGALUPI, Large scale excavation with nuclear explosives, UCRL-5457 (1959).
18. COHEN E., Response of protective vaults to blast loading, AEC-TR-1451.
19. CRAWFORD J. E., Operation Plowshare — Construction through destruction, Ind. Rev. (Africa) 10.5 (1958) and *Atomics and Energy* 3, 11 (1958).
20. CRAWFORD J. E., Design of Underground Structures to resist Nuclear Blast, Dissertation Abstracts, vol. 19, n° 10, april 1959, p. 2561 (d. C. Card no MIC 59-543).
21. DOLL E. B., Scaled HE Tests-Operation Jangle, AEC-WT-377.
22. DOLL E. B., Ground acceleration. Ground and air pressures for underground test-Operation Jangle, AEC-WT-380.
23. FREILING E. C., Fractionation - High - Yield surface burst correlation, USNRDL-TR-385.
24. GANNON W. F., Blast and shock measurement II, Close in ground measurements, WT-367 (1952).

25. GLADSTONE S., WASHINGTON US. GOV., June (1957), Underground Bursts, 2.67-2.75, 5.14-5.17, 5.19-5.22, 5.47, 6.26-6.34, On the effect of nuclear weapons.
26. HOLMES, NARVER, Completion Report, Project Chariot, Operation Plowshare, AECU-4039 (1958).
27. JOHNSON C. W., The soviet program for industrial applications of explosions, AEC-UCRL-5932.
28. JOHNSON C. W., Peaceful Nuclear Explosions-Status and Promise, Nucleonics, vol. 18, n° 7, July 1960, p. 49.
29. JOHNSON C. W., Non-Military Uses of Nuclear Explosives, Scientific American 199, n° 6, December 1958, p. 29/35.
30. KOOPMANS L. H., Fitting a family of curves to scaled data of crater radius versus depth of burst, AEC-SCTM-399-58 (51).
31. LATTE A. L., MARTINELLI E. A., TELLER E., Seismic Scaling Law for underground Explosions. Phys. Fluids USA (1959) 2, 3, 280-282.
32. LEE A. A., WONG E. Y., Operation Hardtack, Evaluation of blast and shock effects on tunnel support structures, ITR-1714 (1959).
33. LOMBARD D. B., Plowshare Program : Peaceful Uses for Nuclear Explosives, AEC-UCRL-6081.
- 33b. MASSON WARREN P., Physical Acoustic and properties of solids, Van Nostrand Cy 1958.
34. MERRITT M. L., Earthmoving by nuclear Explosives, AEC-SCTM-78-59 (51).
35. MORRIS W. E., Blast and shock measurements III Transient Ground displacement Measurement, AEC-WT-358.
36. MORRIS W. E., Transient Ground Displacement Measurement, Operation Jangle, AEC-WT-382.
37. MORRIS W. E., Ground acceleration measurements, Operation Jangle, AEC-WT-388.
38. MORRIS R. H., SCHNEIDERMAN R. C., Operation hardtack, Phase II, Earth Motion Studies, ITR-1706 (1959).
39. MORRIS W. E., Blast and shock measurements III, Transient ground displacement measurements, WT-368 (1959).
40. MURPHEY B. F., AMES E. W., Air pressure versus depth of burst, SCTM-42-59 (51) (1959).
41. MURPHEY, B. F., Mac DOUGALL H. R., Crater Studies, Desert alluvium, SCTM-119-59 (51) (1959).
42. Operation HARDTACK, Summary report of strong motion measurements, Underground Nuclear detonation, AEC- ITR-1711.
43. Operation PLOWSHARE, Peaceful Uses for Nuclear Explosives, Atomic World G. B. (1959), 10, 5, 172-177.
44. Operation PLUMBBOB, Surface motion from an underground detonation, AEC-WT-1528.
45. Operation PLUMBBOB, Photographic analysis of earth motion, shot Rainier, WT-1532 (1958).
46. Peaceful Uses of nuclear explosions, TID 3522, October 1958.
47. PERKINS B. Jr., THOMPSON A. A., Operation Hardtack, Phase II, Preliminary report on medium studies, ITR-1709 (1958).

48. Plowshare Projects Reviewed at Cleveland, *Nucleonics*, 17.6, 96-98 (1959).
49. PORZEL F. B., New Concepts for Control and Use of Nuclear Explosions, ARF-TM-421 (1959).
50. PORZEL F. B., Some Peace Time Uses for Nuclear Weapons, ARF-TH-D-1 (1957).
51. PROKROVSKII G. I., On the Use of Nuclear Explosions for industrial purposes, AEC-tr-4005.
52. SACHS D. C., SWIFT L. M., Operation Teapot underground explosion effects, WT-1106 (DEL) (1959).
53. SAKHOROV V. M., KOLESNIKOV-SCIRANEV V. I., NAZARENCK V. A., Local distribution of soil « throwout » from underground explosions, SCL-T-240 (1959).
54. SCHOFIELD L. N., VORTMAN L. J., Craters formed over a concrete stratum SCTM-61, 59 (51) (1959).
55. SCHORR M. G., GILFILLAN E. S., Predicted scaling of radiological effects, WT-391 (DEL) (1952).
56. SHELTON A. V., The Neptune Event, A nuclear explosive cratering experiment, AEC-UCRL-5766.
57. SMITH F. L., Nuclear Explosives and Mining Costs, AEC-UCRL-5928.
58. STETSON R. L., SHIRASAWA T. H., SANDOMIRE M. M., BAUM S., Distribution and intensity of fallout from the underground shot, WT-1154 (1959).
59. VORESS Hugh E., Peaceful uses of nuclear explosions, TID-3522 (Rev. 1), April 1959.
60. VORESS H. E., Peaceful uses of nuclear explosions, TID-3522 (3rd Rev.), April 1960.
61. VORESS H. E., Peaceful uses of nuclear explosions, TID-3522 (Rev. 2), September 1959.
62. VORESS H. E., Peaceful uses of nuclear explosions, AEC-TID-3522, October 1958.
63. VORESS H. E., Peaceful uses of nuclear explosions, AEC-TID 3522, November 1960, rev. 4.
64. VORTMAN L. J., Estimated nuclear explosives requirement for canal excavation, AEC-SCTM-432-58 (51).
65. VORTMAN L. J., Relative Cratering efficiency of nuclear explosives, AEC-SCTM-114-59 (51).
66. WHITMAN R. V., Soil Mechanics considerations pertinent to predicting the immediate and eventual size of explosion craters, AEC-SC-4405.
67. WILMARTH V. R., Some effects of underground nuclear explosions on tuff, AEC-TEI-756.
68. YOUNG G. A., Base surge analysis for nuclear tests, Operation Jangle, AEC-WT-390.
69. ZELDOVICH Ia B., KOMPANEETS A. S., Theory of Detonation, Academic Press N. Y. 1960.

CDNA000007FRC