

Les explosions pacifiques

J. Despois et J. Sarcia *

Les grands travaux peuvent être considérés comme un remodelage local de la planète, en vue de la rendre plus accueillante à l'homme. Si un isthme large de quelques dizaines de kilomètres ne permet aux navires de passer d'une mer dans une autre qu'au prix d'un détour de plusieurs milliers de kilomètres, on pensera au creusement d'un canal : l'homme voudra ainsi corriger une particularité géographique qui lui était préjudiciable. De la même manière, il peut se trouver que la nature géologique d'un gisement de pétrole ou de gaz rende difficile ou même impossible son exploitation avec un débit suffisant : on cherchera alors à corriger le paramètre géologique défavorable, grâce, par exemple, à une fracturation hydraulique. Pour modifier, à son bénéfice, certaines caractéristiques géographiques et géologiques de sa planète, l'homme dispose de nombreux moyens, parmi lesquels, particulièrement puissant, l'outil nucléaire dont la finalité n'est pas différente de celle des autres : il a, comme eux, ses contraintes propres, ses avantages et ses inconvénients ; mais les possibilités exceptionnelles qu'il comporte peuvent en faire un des grands moyens d'action du FUTUR.

Une technique déjà au point

L'idée d'utiliser les explosions nucléaires à des fins pacifiques n'est pas nouvelle. Dès 1939, un brevet français déposé par Joliot-Curie, Halban et Kowarski était modestement intitulé « Perfectionnement aux charges explosives ». En 1946, alors que l'Armée américaine venait de faire exploser ses premières bombes, Joliot-Curie, dans « La revue générale des sciences » envisageait d'utiliser les engins nucléaires « pour procéder à des transformations de terrain, de sols, de sous-sols marins ».

On commença à envisager sérieusement des réalisations quand, en 1949, l'Union Soviétique déclara à l'O.N.U. par la voix de M. Vichinsky, qu'elle avait décidé d'utiliser les engins nucléaires pour exécuter des grands travaux de génie civil, comme des arasements de montagnes ou des creusements de mers. Par la suite, l'U.R.S.S. a effectué de nombreux tirs

nucléaires civils, en vue de la stimulation de gisements de pétrole, notamment en milieu calcaire, de la construction de réservoirs souterrains de gaz naturel, du contrôle de puits de pétrole en éruption, de la création de cratères en ligne permettant d'envisager le creusement de canaux (projet de détournement des eaux de la rivière Petchora). Accessoirement, les études concernant ce dernier type d'application ont permis de dominer le problème des tirs de très fortes charges d'explosif classique (plusieurs milliers de tonnes) pour la construction de barrages en terre par effondrement des parois d'une vallée.

En Occident, après le scepticisme de 1949 concernant les intentions du gouvernement de l'U.R.S.S., les idées n'évoluèrent que lentement. Certes, dès 1950, aux Etats-Unis, le Lawrence Radiation Laboratory proposa que soit mis sur pied un vaste projet de développement des applications pacifiques des explosions nucléaires. En 1956, l'ingénieur français Camille Rougeron publiait son ouvrage « Les applications pacifiques de l'Energie thermonucléaire » où il proposait d'utiliser des explosions souterraines de bombes à fusion pour exécuter des terrassements géants, forer des réservoirs souterrains et même capter la chaleur géothermique. Il montra que les coûts pouvaient s'avérer beaucoup plus économiques que ceux des explosifs classiques et, en extrapolant les formules établies pour ces derniers, il établit que les risques de telles opérations bien conduites étaient pratiquement nuls.

Ce n'est qu'en 1957 que la Commission Américaine de l'Energie Atomique fut chargée de conduire le programme « PLOWSHARE », c'est-à-dire « Soc de charrue ». A partir de résultats d'essais d'engins militaires, plusieurs projets furent étudiés en détail de 1958 à 1961. Puis, le premier tir à finalité purement civile eut lieu le 10 décembre 1961. De nombreux autres essais, dont les résultats furent publiés, ont ensuite été pratiqués dans des terrains variés, à des profondeurs allant de 0 à 2 500 mètres. La France n'a pas encore effectué de tir nucléaire à des fins spécifiquement civiles, mais les résultats de 13 tirs souterrains effectués au Hoggar de 1961 à

* Commissariat à l'Energie Atomique.

1966 ont été soigneusement dépouillés dans cette optique. Une partie des renseignements ainsi recueillis a d'ailleurs été publiée à la demande de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique. Depuis ce temps, les études se sont poursuivies, notamment dans le domaine des tirs sous les fonds marins.

En 1974, l'Inde a été le premier pays à faire son entrée dans le monde des réalisations de tirs nucléaires en déclarant officiellement n'avoir que des objectifs pacifiques. De leur côté, les Etats non détenteurs d'armes atomiques ont toujours suivi de très près les développements de cette technique, comme le montre l'intérêt porté aux réunions qui leur sont consacrées au siège de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, à Vienne.

Un certain nombre de pays seraient techniquement capables de fabriquer au moins certains engins nucléaires pacifiques de première génération. Mais, pour ceux qui ont signé le Traité de Non-Prolifération des Armes Nucléaires, la mise en œuvre directe d'un engin est pratiquement interdite. Il résulte de cet intérêt mondial pour l'utilisation pacifique des explosions nucléaires que de nombreuses données scientifiques et techniques sont actuellement disponibles. Les spécialistes des différents pays concernés en savent maintenant assez pour se faire une idée précise sur les effets des tirs, sur leur sécurité et sur l'intérêt économique des différents projets qui peuvent être envisagés.

Doubler le canal de Panama

L'intérêt majeur des explosifs nucléaires réside dans leur très faible encombrement. A résultat égal, l'engin nucléaire se présente sous la forme d'un cylindre que l'on peut descendre dans un forage, alors que l'explosif classique nécessiterait le creusement de chambres de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes et la mise en place de centaines de milliers de tonnes d'explosif. On conçoit que l'explosif nucléaire permette même de réaliser des travaux qui seraient impossibles à concevoir autrement. En outre, le coût de l'engin ne dépend que faiblement de l'énergie dégagée, ce qui peut donner à la solution nucléaire un avantage économique décisif, dès que l'énergie nécessaire est suffisamment grande.

Si l'engin est enterré à une profondeur suffisante, compte tenu de l'énergie dégagée, il se formera, après le tir, une cavité qui s'effondrera, le plus souvent, jusqu'à l'obtention d'une structure stable (tir contenu). Si la profondeur du tir est faible, cet effondrement pourra se propager jusqu'au jour, créant un cratère de subsidence ; à des profondeurs plus faibles encore, c'est la cavité elle-même qui va provoquer une boursoufflure du terrain, formée d'un monticule de déblais : on obtient alors un « cratère inversé ». Enfin, si l'on réduit encore la profondeur, la couche de terrain qui surmonte l'engin ne pourra plus résister aux efforts de traction auxquels elle est soumise ; elle va se rompre : des déblais seront projetés en altitude et retomberont, en majeure partie dans le cratère ainsi formé, recouvrant les laves demeurées au fond, et partiellement à l'exté-

rieur du cratère en formant une lèvre autour de celui-ci ; la disposition de cratères en série permet d'envisager des excavations allongées.

A l'origine du programme américain PLOWSHARE, ces tirs cratérisants ont suscité le plus grand enthousiasme. Des études furent menées en vue du doublement du canal de Panama par un canal sans écluse, économisant 50 % du temps de traversée des bateaux. D'autres études ont également été faites pour la construction de ports artificiels, pour les grands travaux d'hydraulique (réalignements de nappes, rejets d'eaux usées), les grandes tranchées d'autoroute ou de chemin de fer, les carrières et les mines à ciel ouvert.

Pourtant, pour des raisons que l'on développera plus loin, c'est vers les tirs contenus que chercheurs et industriels tentent maintenant à se tourner. On a déjà utilisé, aux Etats-Unis, des tirs contenus dont le faisceau neutronique permet de fabriquer des isotopes de transuraniens que l'on ne peut pas obtenir dans des réacteurs (expérience MIKE entre autres). Une production industrielle d'isotopes plus classiques, à usages médicaux, a été envisagée. Elle ferait appel à des tirs nucléaires dans une couche de sel, à raison d'un par mois. Selon les estimations américaines les prix de revient pourraient être beaucoup plus faibles que ceux auxquels conduisent les procédés classiques d'activation par un réacteur nucléaire.

Comme on l'a déjà vu, les explosions nucléaires contenues peuvent être utilisées pour créer une fracturation permettant l'exploitation du gaz naturel présent dans les terrains faiblement perméables. Seulement dans l'Ouest des ETATS-UNIS, l'application de cette technique est envisageable sur des champs dont les réserves, actuellement inexploitable, correspondent au double des réserves actuelles des U.S.A. Le prix de revient serait égal ou inférieur à celui du gaz actuellement importé. Le premier essai, en vraie grandeur (RIO BLANCO) n'a pourtant pas été totalement concluant. Le tir s'est passé sans le moindre incident, mais le gaz naturel récupéré s'est avéré moins abondant que prévu.

La stimulation de gisements de pétrole présente certains points communs avec la stimulation de gisements de gaz, bien que les problèmes d'écoulements fluidiques et les spécifications nucléaires soient assez différents dans les deux cas. Evidemment, la stimulation nucléaire ne doit être envisagée que dans les cas où la fracturation hydraulique du terrain est inefficace ou conduit à des coûts prohibitifs.

On peut rapprocher de la stimulation nucléaire, les recherches menées sur la combustion in-situ, après fracturation, des grès asphaltiques et des schistes bitumineux, afin d'en extraire le pétrole. On peut aussi concevoir la fabrication in-situ de gaz à partir de couches de charbons inexploitable classiquement en raison de leur profondeur ou de leur situation géologique. C'est aussi pour leur pouvoir de fracturation que l'on peut penser à l'emploi d'engins nucléaires en exploitation des mines, soit que le minerai fracturé puisse être exploité par un dispositif conventionnel, soit

qu'une lixiviation in-situ soit envisagée. Ce dernier cas s'applique bien à des minerais normalement inexploitable, car de teneur trop faible. On a ainsi envisagé de récupérer du cuivre à partir de gisements d'oxyde. Une autre utilisation de la fracturation nucléaire consiste à obturer dans le sol un puits de pétrole ou de gaz en éruption incontrôlée ou en feu. Une étude française a été menée en vue de comparer le coût d'une extinction d'un puits en feu par des procédés classiques et à l'aide d'un engin nucléaire. Dans un cas concret, une opération d'extinction a coûté effectivement 36 millions de francs. L'emploi d'un engin nucléaire aurait permis d'abaisser ce coût à moins de 10 millions, tandis que le gain de temps aurait évité le gaspillage de 2,5 milliards de mètres cubes de gaz.

Enfin, la fracturation des roches profondes imperméables et chaudes (300 à 350°) permettrait d'en extraire l'énergie géothermique en vue de la production d'électricité. Un rapport américain, étudiant la faisabilité de cette technique, fait apparaître, pour un gradient géothermique anormal d'un degré pour 8 mètres et pour une profondeur de 3 000 mètres, un prix de revient du kilowatt-heure pouvant aller de 2,5 à 10 centimes, suivant les caractéristiques du terrain et le type d'engin utilisé. On ne peut donc pas conclure avec certitude à l'intérêt économique actuel du procédé. Pourtant on se trouve là en face d'une des possibilités les plus intéressantes de récupération d'énergie nouvelle.

Cavités de stockage souterraines

L'autre grand type d'utilisation des tirs contenus consiste à créer des cavités souterraines, généralement emplies d'éboulis. On peut envisager de faire ces cavités pour stocker des déchets chimiques ou nucléaires dans des conditions rigoureuses de sécurité et pour faire des réserves d'énergie sous forme d'air comprimé ou d'hydrogène, notamment, en liaison avec des centrales flottantes dont la réalisation est de plus en plus envisagée.

Dans un avenir proche, ce sont surtout les stockages de gaz et de pétrole qui seront probablement les premières utilisations des cavités nucléaires. Le stockage de gaz est indispensable et le deviendra d'autant plus que les sources d'approvisionnement deviendront plus lointaines : il permet d'optimiser le diamètre des canalisations et la taille des compresseurs, tandis qu'il réduit les incidences fâcheuses des à-coups de consommation et des aléas de l'approvisionnement. Le gaz est actuellement stocké dans des terrains perméables contenant des nappes d'eau captive ou dans des cavités creusées dans le sel par dissolution. Les sites géographiquement bien situés et susceptibles d'être équipés de cette manière ne sont pas en nombre illimité.

De leur côté, les stockages pétroliers permettent l'exploitation nécessairement continue de gisements disposant de moyens d'évacuation discontinus (cas de certaines exploitations sous-marines). Des stockages encore plus importants, à l'échelle d'un ou plusieurs Etats (une ou plusieurs dizaines de millions de tonnes)

1) Mise en place de l'engin nucléaire utilisé pour le tir Rulison de stimulation de gisement de gaz naturel, aux Etats-Unis.

2) Les effets d'un tir débouchant en surface :

Essai Sedan aux Etats-Unis (100 kilo-tonnes - profondeur du cratère : environ 100 m ; diamètre : 370 m).

3) Les effets d'un tir souterrain : cavité créée dans le sel et partiellement éboulée (essai américain Gnome).

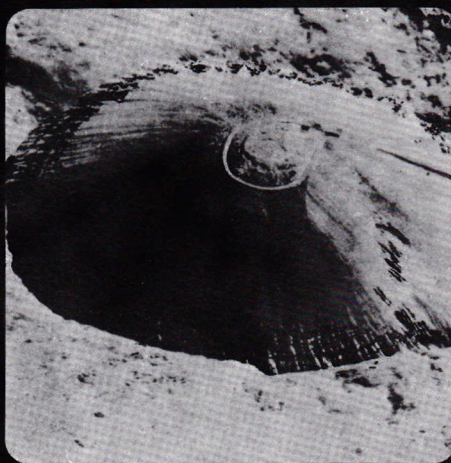
4) Projet français, concernant les superstructures d'un stockage de pétrole brut dans des cavités nucléaires creusées sous le fond de la mer.

5) Ebranlement du sol causé par un tir nucléaire souterrain : nuage de poussière soulevé lors d'un essai français du Sahara. Ces poussières ne sont évidemment pas radioactives.

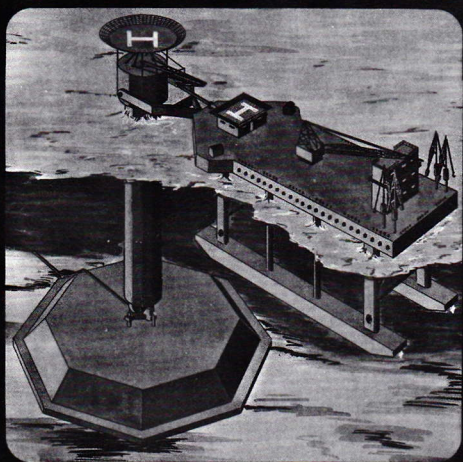
1



2



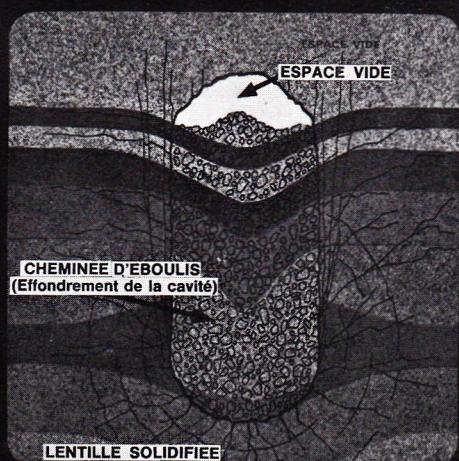
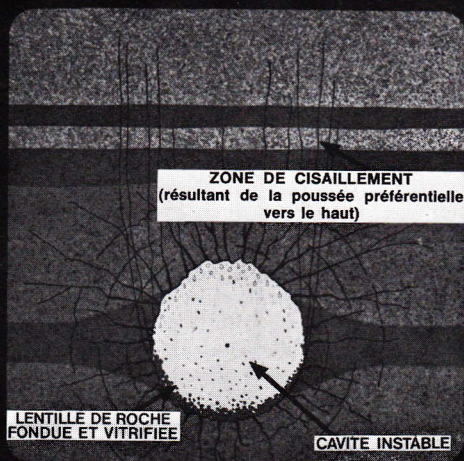
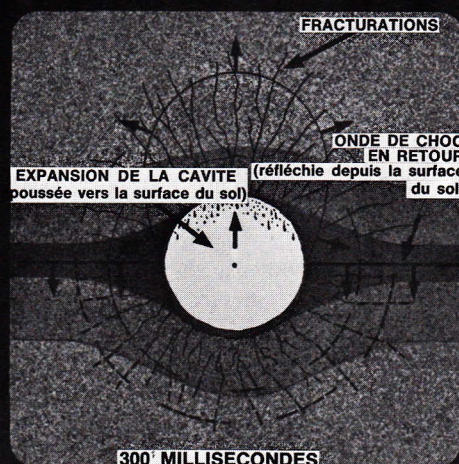
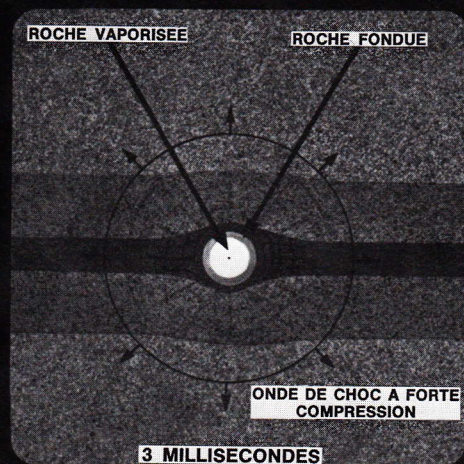
3



4



5



Croissance d'une cavité nucléaire et développement de la cheminée

s'avèrent indispensables pour des raisons de stratégie économique et de sécurité d'approvisionnement. La vulnérabilité et surtout le coût élevé des réservoirs métalliques, dépassant 150 francs par mètre cube, a conduit à rechercher des solutions de rechange pour les grands stockages : on utilise des cavités creusées dans le sel, d'anciennes mines ou des cavités creusées spécialement avec des moyens mécaniques. Les stockages sur les champs de production sous-marins nécessitent des installations immergées considérables, dont le coût atteint plusieurs centaines de francs par mètre cube. Cette solution est d'ailleurs inutilisable quand la profondeur d'eau dépasse une centaine de mètres.

Qu'il s'agisse de pétrole ou de gaz, les moyens actuels restent donc limités quand ils sont d'un coût acceptable, ou alors, ils ont des coûts très élevés. Le stockage dans des cavités nucléaires peut donc trouver sa place. La caractéristique de tous ces stockages est qu'ils doivent être implantés soit en mer, soit près des zones à forte consommation, donc à fort peuplement. L'appel à une solution nucléaire conduit tout naturellement, dans ce second cas également, à envisager une implantation sous le fond marin. Une étude française a été conduite en vue de la construction d'un stockage pétrolier de 10 à 20 millions de mètres cubes. Le schéma retenu, bien qu'original dans son ensemble, ne fait appel qu'à des techniques éprouvées. Vingt charges nucléaires environ, d'énergie moyenne, seraient tirées vers 1 000 mètres de profondeur, dans des forages situés entre 40 et 75 kilomètres des côtes, afin que l'ébranlement du sol demeure tolérable et, a fortiori, non destructif. L'expédition du pétrole à terre serait assurée soit par un oléoduc, soit par navires pétroliers. Réalisé dans des roches sans intérêt économique, un tel stockage ne compromettrait l'exploitation d'aucune richesse minérale ; il ne pourrait pas perturber les nappes d'eau utilisables, ni polluer la mer ; le produit stocké serait à l'abri de l'incendie et de la malveillance. Les installations seraient invisibles de la côte. Le coût de la réalisation serait inférieur à 35 francs par mètre cube, pour vingt millions de mètres cubes, contre 55 francs pour les cavités livrées dans le sel ou spécialement creusées, ou 150 francs pour les cuves métalliques.

Une disposition légèrement différente des tirs et un équipement annexe approprié permettraient d'envisager de la même manière un stockage de gaz naturel.

Un outil qui cherche encore sa voie

On vient de voir que le tir nucléaire était un outil dont les utilisations possibles sont aussi nombreuses que variées. Il n'y a pas d'exemple, dans le passé, qu'un outil permettant un saut aussi considérable dans le domaine technique n'ait pas été rapidement exploité par l'humanité. On peut même s'étonner du fait que les utilisations pratiques ne se soient pas encore développées sur une vaste échelle. Il y a à cela, avant tout, des obstacles socio-psychologiques ; mais aussi, il faut le dire, il subsiste encore quelques difficultés plus objectives, d'or-

dre technico-économique. Ce n'est pas le tir lui-même, maintenant parfaitement au point, mais l'utilisation de ce moyen à des fins industrielles en est encore à l'âge des balbutiements. On peut, à ce sujet, noter un parallélisme étroit avec les réacteurs nucléaires, dont les prototypes ont maintenant plus de 30 ans, et les centrales électriques nucléaires opérationnelles qui ne vont prendre une part importante dans la production énergétique totale que dans les années à venir.

Des risques objectifs minimes

Le principal obstacle au développement des tirs nucléaires pacifiques est d'ordre passionnel et n'obéit pas aux règles de la logique. Il n'est pourtant pas inutile, avant d'aborder cet aspect du problème, de rappeler objectivement les conséquences directes d'un tir nucléaire pour l'homme et pour l'environnement.

L'explosif nucléaire, comme tout autre explosif, produit des effets certes importants, mais limités et prévisibles. Pour peu que des études approfondies aient été menées à bien correctement, il est donc tout à fait faux de considérer le responsable d'un tir comme un apprenti-sorcier susceptible de déclencher un cataclysme dont il ignore les rebondissements. Les effets susceptibles d'être néfastes sont de deux ordres : la contamination radioactive et l'ébranlement dû au tir. Nous allons les passer en revue. Il convient d'abord de situer le problème de la radioactivité qui inquiète le plus l'opinion publique. La radioactivité, dans le domaine des tirs souterrains, provient d'abord des produits de fission contenus dans l'engin nucléaire, des résidus des matériaux fissiles contenus initialement et n'ayant pas réagi totalement, des produits d'activation engendrés dans les structures inertes de l'engin et dans le terrain par l'important flux de neutrons produit par l'explosion, enfin, éventuellement, dans le cas d'un engin thermonucléaire, du tritium non consommé ou produit par la réaction. On n'est pas sans moyen d'action sur ces différentes productions. L'activation des structures de l'engin peut conduire à des produits inoffensifs si des matériaux appropriés ont été utilisés lors de la construction de l'engin ; l'activation du terrain peut être réduite considérablement par le choix judicieux du milieu de tir, grâce aux techniques géologiques et, dans tous les cas par l'interposition d'un corps absorbeur de neutrons. Les produits de fission peuvent être en quantité très faible si l'on utilise un engin thermonucléaire. Théoriquement, on pourrait les supprimer totalement dès lors qu'on saurait provoquer une réaction de fusion sans faire appel à une amorce à fission. Des recherches sont orientées dans ce sens dans plusieurs pays. L'explosion d'un engin sous le sol provoque la vaporisation et la liquéfaction de la roche. Il en résulte finalement une lave qui piège la grande majorité des produits de fission. Bien entendu, tous les produits de fission ne sont pas intégralement retenus par la lave, bien que, par une disposition appropriée du point du tir, on puisse augmenter la proportion des produits ainsi piégés, même dans le cas de tir formant cratère et débouchant à l'air libre. Néanmoins, certains pro-

duits volatils dans les conditions thermodynamiques du milieu ne vont pas rester dans la lave. On doit distinguer alors deux cas : pour un tir débouchant en surface, ces produits vont nécessairement se répandre dans l'atmosphère et il conviendra de faire une étude de dispersion afin qu'aucun endroit habité ne risque d'atteindre un seuil d'alerte choisi délibérément très bas. Par contre, pour un tir contenu, les produits volatils vont rester dans la cavité formée. En attendant quelques mois, les plus radioactifs d'entre eux, notamment différents isotopes de l'iode, auront totalement disparu. Les autres pourront ensuite être éliminés, si nécessaire, par un rinçage de la cavité obtenue et le traitement des effluents avant rejet. Dans ces conditions, l'apport de radioactivité à l'extérieur peut être abaissé à un niveau très faible et sans danger.

On peut formuler une objection à ce schéma de principe : dans quelle mesure est-on sûr qu'un tir sera effectivement complètement contenu ? D'abord, les conditions de contention sont maintenant bien connues et le risque de départ massif de matière à l'occasion d'un tir contenu bien conçu peut être tenu pour pratiquement exclu. Pourtant, un projet sérieux doit prévoir ce scénario de l'impossible et étudier soigneusement les conséquences de ce que l'on pourrait appeler l'« accident maximum ». Les mesures à prendre dans ce cas sont prévues. Les concepteurs d'engin ont, eux, imaginé que le responsable du tir pouvait être quelque Docteur Folamour, et tenant compte de ce risque si minime soit-il ont pris toutes les mesures nécessaires : c'est la sécurité maximum qui est visée.

Le risque sismique

Le problème de la radioactivité n'est pas, aux yeux des spécialistes, le plus important, du moins dans le cas des explosions contenues : la contrainte majeure réside surtout dans l'ébranlement du sol consécutif au tir. On ne tire évidemment pas des charges parfois équivalentes à plusieurs centaines de milliers de tonnes d'explosif classique, sans que se propage dans le sol une perturbation qui, par certains aspects, rappelle les tremblements de terre.

L'onde de choc se produit d'abord à un moment bien déterminé et connu ; ensuite son ampleur, son extension et ses effets sont accessibles à l'expérimentation et au calcul, donc prévisibles. Au total, cela se traduit par des contraintes technico-économiques, beaucoup plus que par un problème de stricte sécurité. C'est à cause de l'ébranlement qu'il n'est pas possible de tirer dans des zones peuplées et que, en Europe, on ne peut guère, pour le moment, envisager que des utilisations sous le fond marin. La prévision des effets suppose une connaissance parfaite des caractéristiques géotechniques du sous-sol dans une large zone autour du point de tir, afin de pouvoir tenir compte des effets de focalisation ou de réflexion des ondes sismiques. Dans beaucoup de cas, une étude soignée sera suffisante. On lit parfois que les tirs nucléaires peuvent provoquer des tremblements de terre dont la magnitude serait alors incontrôlable.

Il faut, là encore, adopter une attitude nuancée. D'abord, aucun des très nombreux essais nucléaires civils ou militaires effectués à ce jour n'a provoqué de séisme dangereux, bien que certains tirs particulièrement puissants aient été effectués dans des zones instables de l'écorce terrestre. On a, par contre, constaté l'existence de petites « répliques », après un tir. Est-ce à dire qu'un tir nucléaire ne peut en aucun cas déclencher un séisme ? Par lui-même, le tir ne peut pas engendrer des contraintes suffisantes, mais il est évident que, s'il y a une contrainte préexistante, elle pourra être libérée. Autrement dit, le tir nucléaire (ou tout tir d'explosif très puissant) peut avancer la date d'un tremblement de terre.

On voit là une conséquence majeure : dans la mesure où, à l'horizon 2000, la prévision des séismes aura sensiblement progressé, on pourra envisager, après évacuation de la population, de libérer les contraintes dangereuses à heure fixée, en produisant des dégâts d'autant plus faibles que la magnitude sera moins grande que celle escomptée naturellement et que des précautions auront été prises.

Des obstacles plus imaginaires que réels

Comme on vient de le voir, les risques objectifs sont connus, mesurables et, a priori, ils ne sont pas supérieurs à ceux inhérents à tout travail humain, si les études et les réalisations sont conduites correctement. Aux Etats-Unis, comme en U.R.S.S., on n'hésite pas à faire des tirs nucléaires contenus à proximité d'agglomérations importantes. Las Vegas est à une centaine de kilomètres du polygone d'essais du Nevada. Ceci montre à l'évidence que la difficulté majeure qu'éprouvent les tirs nucléaires à se généraliser est d'ordre purement psychologique. On n'a, pourtant, signalé aucun accident de personne lors des très nombreux tirs pacifiques réalisés aux U.S.A. ou en U.R.S.S.

L'assimilation « logique » mais abusive entre les explosions nucléaires civiles et militaires conduit inconsciemment à la confusion des risques. Toute activité humaine provoque des nuisances. En contrepartie d'un gain qui la justifie, elle comporte un résidu négatif, que l'on convient d'appeler du terme générique et imprécis de « pollution ».

En fait, pour chaque opération, de même que l'on fait un bilan économique, on devrait faire un bilan que l'on pourrait appeler « écologique », faute d'un mot mieux adapté. Ce bilan permettrait d'abord d'établir si l'opération est bénéfique pour l'homme et, si tel est le cas, quelle est la méthode d'exécution qui apporte le moins de contreparties négatives et de risques. Bien souvent, beaucoup seraient surpris de constater que la solution de l'explosif nucléaire se place fort honorablement.

Les étapes du développement

Puisque le tir nucléaire n'est qu'un outil à fins multiples, il est très difficile de prévoir selon quelles voies cette technique va se développer. Ce serait prétendre connaître, dès maintenant, non seulement, les grands travaux qui vont occuper l'humanité dans les années à

venir, ce qui est concevable, mais aussi dans quelle mesure va évoluer la compétitivité économique des différentes techniques envisageables pour les mener à bien. Cette prétention est évidemment irréaliste, dès que l'on veut aller au-delà de quelques années. Donc plutôt qu'un inventaire de réalisations qui serait sûrement démenti par les faits on va plutôt tenter de définir ici quelques tendances probables.

Actuellement, certaines réalisations industrielles ont déjà eu lieu (maîtrise d'éruption de puits de gaz, en U.R.S.S.) ; mais, le plus souvent, bien qu'on ait dépassé le stade des essais de phénoménologie, on en est resté aux opérations prototypes, avec des résultats divers quant à l'intérêt économique. Il faut s'attendre à ce que l'U.R.S.S. poursuive sa politique discrète, lente et progressive. Aux U.S.A., les années à venir pourraient marquer une certaine pause. Il y a, à cela, plusieurs raisons : la situation économique générale, le découragement momentané des investisseurs après le résultat mitigé du dernier essai de stimulation nucléaire d'un gisement de gaz (effectué sur un terrain particulièrement difficile), peut-être une certaine volonté politique. Mais ce ralentissement sera de courte durée (quelques années), car les Etats-Unis auront à faire face aux demandes pressantes de certains pays non dotés d'armes nucléaires et signataires du Traité de Non-Prolifération, voire à la concurrence de pays comme la France. Pendant cette période d'attente, si la France adoptait une politique volontariste elle pourrait se trouver bien placée sur le marché. La Chine et le Royaume-Uni sont en mesure d'adopter une attitude identique. Pour les autres pays, les difficultés proviendront du fait qu'il ne suffit pas de fabriquer un engin prototype pour prendre pied sur le marché à venir : la parfaite maîtrise des performances des engins est nécessaire et celle-ci demande des années d'expérience et de nombreux essais.

Probablement jusqu'à la fin du siècle, le marché sera encore trop peu développé pour justifier les études fondamentales et les essais très coûteux nécessaires pour construire des engins pacifiques spécialement conçus. Les engins utilisés dériveront des engins militaires et, l'on peut penser que, malgré des adaptations et des améliorations, ils continueront à engendrer des produits radioactifs.

Dans ces conditions, on doit plutôt s'attendre à un développement des tirs contenus. Ils serviront à la constitution de réservoirs, à l'extinction d'incendies, ou à l'arrêt d'éruption de puits de pétrole, ou de gaz, notamment en off-shore, contribuant ainsi à la lutte contre la pollution. Il y aura des utilisations basées sur la fracturation (stimulation de pétrole et de gaz, lixiviation in-situ, peut-être combustion in-situ), mais on se limitera probablement aux gisements de profondeur assez faible (1 500 m ou moins) pour lesquels la mécanique des roches est la plus favorable. Les explosions formant cratère ne seront pas vues d'un bon œil, en raison de la légère augmentation de radioactivité atmosphérique qu'elles entraînent. Le traité de Moscou constitue d'ailleurs, à ce sujet, un obstacle juridique important. Il pourrait ce-

pendant y avoir quelques programmes dans des zones très peu peuplées du globe, lorsque l'urgence et l'importance vitale du projet le nécessiteront et permettront de considérer la contrainte de radioactivité comme secondaire. Il pourrait s'agir de grands programmes d'hydraulique dans des pays en cours de désertification (lutte contre la sécheresse).

La radioactivité décroît

Lors de ces grandes réalisations industrielles, il apparaîtra que le développement généralisé des tirs nucléaires serait acquis s'il existait un moyen de supprimer quasi totalement la contrainte radioactive. Les recherches menées dans ce sens dès maintenant dans le monde seront donc accentuées. Les engins thermonucléaires avec un amorçage modifié, pratiquement sans produits de fission, ne donnant que des quantités négligeables de tritium et munis de dispositifs réflecteurs et absorbeurs de neutrons permettront d'envisager de grands travaux de terrassement pour lesquels la seule contrainte majeure restera l'effet sismique. Ces engins peuvent résulter d'une amélioration progressive de ceux qui existent actuellement, ou, plus probablement, du développement de solutions entièrement nouvelles. Il n'est pas déraisonnable de penser qu'ils soient disponibles dans 25 ou 30 ans, mais seuls les pays qui se seront engagés assez tôt dans la voie des tirs pacifiques auront acquis les connaissances technologiques suffisantes pour accéder à cette évolution.

Si cette prévision se réalise, ce qui a un bon degré de probabilité, l'énergie nucléaire, dans son aspect le plus brutal, se sera alors pratiquement affranchie de sa plus grande sujétion, le dégagement de radioactivité. Alors même que les réalisations se multiplieront, les nuisances produites par chacune d'entre elles iront en diminuant. Une certaine tendance dans ce sens se constate dès maintenant, puisque, contrairement à ce que l'on pense souvent, malgré la poursuite des tirs, la radioactivité atmosphérique décroît régulièrement après la légère augmentation constatée il y a une dizaine d'années, en raison des nombreux tirs militaires russes et américains effectués sans précautions particulières avec des engins relativement très polluants.

La mise au point des armes nucléaires a nécessité un immense effort intellectuel et technologique. Il n'est pas ici dans notre propos de discuter du bien-fondé de cet effort, mais aucun être humain ne peut contester l'intérêt, tant économique que philosophique, que présenterait son utilisation à des fins pacifiques. Que le travail fourni pour construire ce qui, plus qu'une arme, est le symbole même de la destruction et de la mort puisse un jour servir à augmenter le bien-être de l'humanité, voilà qui représenterait une vraie revanche de la vie.

J.D. J.S.