

ESSAIS NUCLÉAIRES : POURQUOI PAS EN MÉTROPOLÉ ?

Philippe Gillet
Christophe Lecuyer
Pierre Choukroune

Éléments de réponse à une question naïve

PHILIPPE GILLET et
CHRISTOPHE LECUYER,
Département des sciences
de la Terre, ENS Lyon.
PIERRE CHOUKROUNE,
CESE, Marseille.

**Pourquoi la France
procède-t-elle à ses essais
nucléaires dans le Pacifique et
pas en métropole ? Est-ce en raison
des risques inhérents à ce type
d'expérimentation ? De particularités
géologiques ?**

Supposons que pour faire ses essais nucléaires, la France n'ait pas eu d'abord l'Algérie, puis la Polynésie, ni même la possibilité de sous-traiter avec les États-Unis — comme l'ont fait les Britanniques. Aurait-elle pu les réaliser en métropole, à l'instar des Russes ou des Américains ? La question posée ironiquement par certains opposants aux essais français n'appelle pas une réponse simple.

Les bassins sédimentaires (Parisien, Aquitaine, Rhin, Limagnes, Camargue), qui occupent environ la moitié du territoire national, sont éliminés d'office : tout essai contaminerait rapidement les nappes d'eau potable.

Restent les terrains volcaniques (les basaltes du Massif central) et aussi les granites des massifs anciens de Corse, et encore du Massif central ou de Corréze. C'est dans les granites du Sahara algérien que la France a mené ses premiers essais souterrains. Basaltes et granites présentent sensiblement les mêmes caractéristiques mécaniques. Ils sont à même de confiner les effets d'un tir souterrain situé à mille mètres de profondeur. En fonction des données publiées par le CEA pour les basaltes polynésiens, il est possible de cerner les risques encourus sur le site d'expérimentation lui-même et dans les régions plus éloignées⁽¹⁾. L'onde de choc générée par l'explosion nucléaire fracture la roche dans un rayon d'une centaine de mètres (fig. 1). Au-delà, dépossédée de la majeure partie de son énergie, elle se propage sous la forme d'une onde élastique comparable à celle produite par un séisme de magnitude 3 à 5,5². Ce qui est loin d'être négligeable : le tremblement de terre d'Arrette qui, le 13 août 1967, ruina

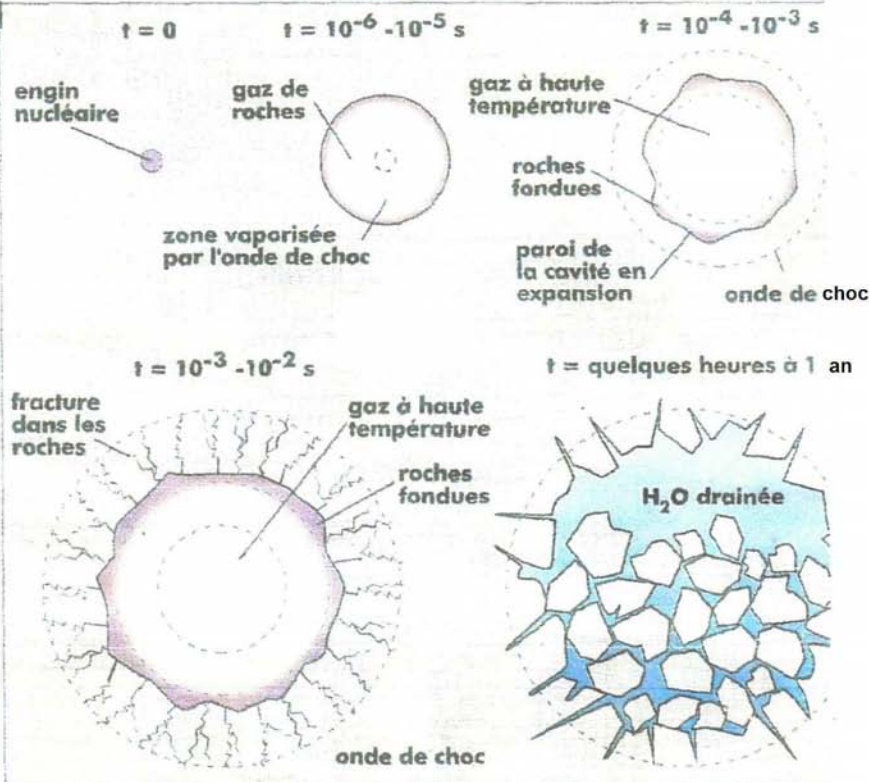


Figure 1. Dans les secondes qui suivent l'explosion, la réaction nucléaire crée une boule de feu dont le rayonnement thermique est absorbé par les roches environnantes. Les roches situées dans un rayon d'une dizaine de centimètres sont chauffées à plusieurs millions de degrés et soumises à des pressions de plusieurs dizaines de millions d'atmosphères (tout dépend de la puissance de l'engin).

A proximité du point de l'explosion, l'eau et les gaz piégés dans les roches sont vaporisés, favorisant du même coup la fusion et la pulvérisation des roches elles-mêmes.

Une cavité se forme, d'un rayon de dix à quarante mètres pour des tirs de un à cent kilotonnes.

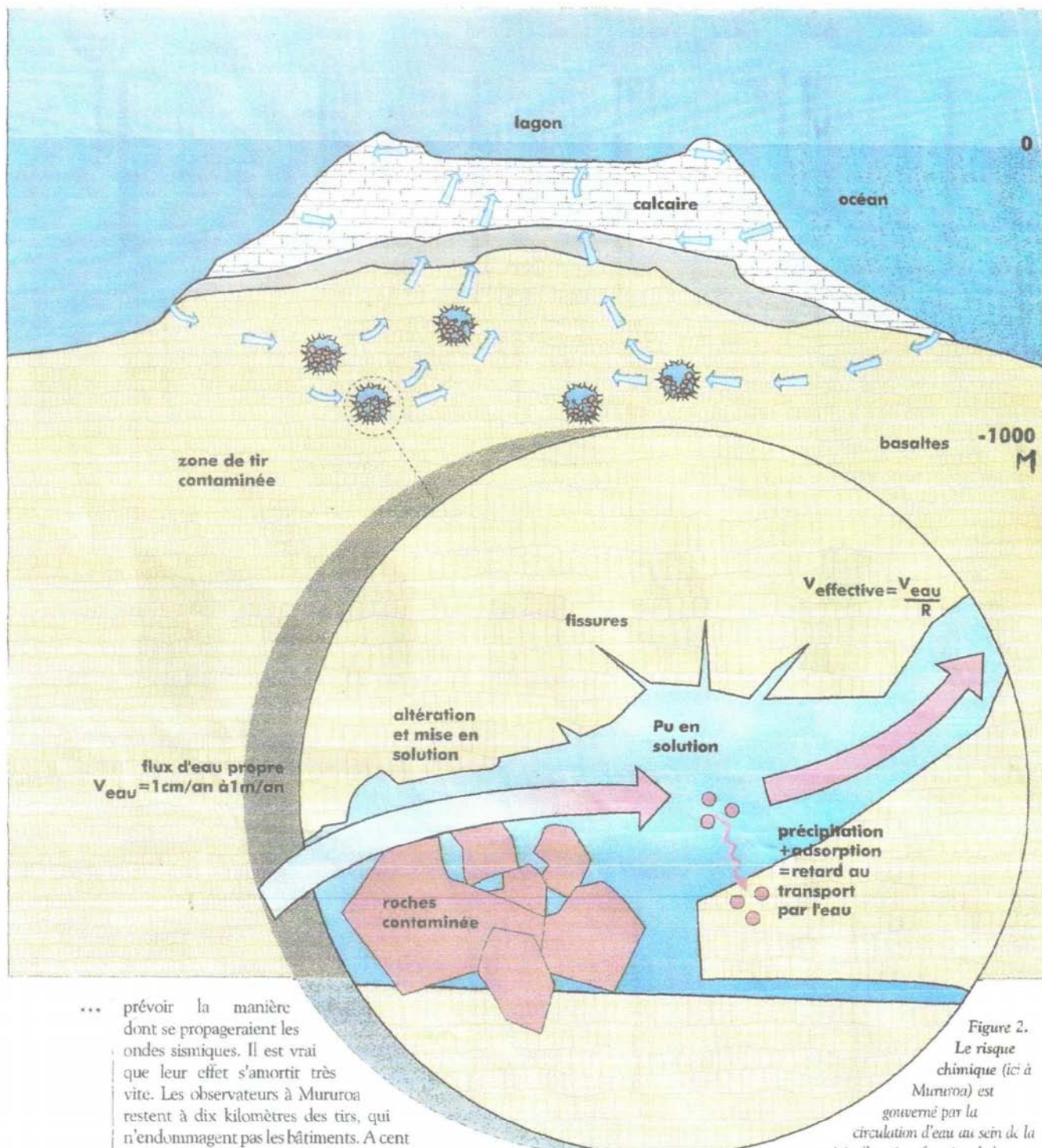
Les roches fondues (magma) s'accumulent au fond de cette cavité. La cavité croît sous l'effet d'une onde de compression qui dissipe son énergie en chauffant les roches, en les comprimant et en les transformant de proche en proche. A quelques dizaines de mètres du point zéro et parfois jusqu'à plus de cent mètres, un réseau de fractures radiales se développe. Au-delà, le peu d'énergie restant (quelques pour-cent) court sous la forme d'une onde élastique comparable à celle produite lors d'un tremblement de terre de magnitude 3 à 5,5. Les gaz et l'eau contenus dans la cavité se refroidissent et se condensent. La chute de pression qui en résulte conduit à l'effondrement progressif de la cavité. Partiellement comblée par son affaissement sur elle-même, la cavité se remplit d'eau drainée depuis les roches environnantes. Il faudra une dizaine d'années pour que la température redevienne normale.

soixante-deux communes des Pyrénées Atlantiques, faisant un mort et quinze blessés, avait une magnitude de 5,3. Le foyer du séisme était à vingt-cinq kilomètres d'Arrette, et des dégâts ont été observés à plus de cent kilomètres. En milieu océanique les risques sismiques directs concernent les infrastructures présentes

sur les atolls et aussi leurs flancs rocheux, qui peuvent se déstabiliser et créer un raz-de-marée. Les choses se compliquent en milieu continental et en France en particulier. La grande disparité des terrains géologiques et la complexité de leur géométrie, héritée d'une plus longue évolution, rend difficile, voire impossible, de

L'ONDE SISMIQUE
engendrée par une
explosion d'une énergie
donnée a la même
magnitude en mer ou à
terre.

**LA CIRCULATION DES
FLUIDES** dans les roches
volcaniques et granitiques
se fait essentiellement au
travers du réseau de
fissures et de fractures qui
se sont développées au
cours de leur histoire en
réponse aux contraintes
tectoniques et thermiques.



... prévoir la manière dont se propageraient les ondes sismiques. Il est vrai que leur effet s'amortit très vite. Les observateurs à Mururoa restent à dix kilomètres des tirs, qui n'endommagent pas les bâtiments. A cent kilomètres, les ondes ne dépassent plus quelques dizaines de micromètres.

Certains éléments, dont le césium et le strontium, se retrouvent très rapidement en solution dans les eaux infiltrées dans la cavité

Mais il faut compter avec les effets locaux d'amplification, qui peuvent se manifester à plusieurs dizaines de kilomètres du point de tir. En passant d'un granite ou d'un basalte massifs à des sédiments plus ou moins consolidés, les mouvements du sol s'amplifient. Un phénomène observé par exemple il y a tout juste un an lors du séisme de Kobe,

au Japon : l'amplification locale des ondes sismiques, liée à la présence d'alluvions sous la ville, a conduit à des accélérations de l'ordre de 0,8 g (soit environ 8,7 m/s²) occasionnant des dégâts considérables. Le foyer du séisme était pourtant situé à plus de soixante kilomètres de la ville. D'où la nécessité de trouver un site non habité dans un rayon de sécurité de l'ordre d'une centaine de kilomètres. Une impossibilité en métropole. Supposons malgré tout qu'une menace de guerre conduise les autorités à écarter cet argument et à déplacer les populations les plus exposées. Un autre facteur s'opposerait aux essais : le risque de pollution chimique. Certains éléments,

selon leur nature, les éléments radioactifs issus du tir sont soit directement mis en solution dans l'eau (césium 137), soit piégés dans les magmas refroidis (plutonium 239) et remis en solution dans l'eau ultérieurement. Tout dépend de la cinétique d'altération des roches et de leur facilité ou non à être mises en solution.

dont le césium et le strontium, se retrouvent très rapidement en solution dans les eaux infiltrées à l'intérieur de la cavité formée par l'explosion (fig. 1). D'autres, comme le plutonium, restent piégés dans le magma et ses dérivés refroidis. Leur évolution ultérieure est régie d'une part par la circulation des masses d'eau dans le massif rocheux et, d'autre part, par l'ac-

Figure 2. Le risque chimique (ici à Mururoa) est gouverné par la circulation d'eau au sein de la cavité, elle-même fonction de la

... tion chimique de l'eau sur les roches, qui peut remettre en solution les éléments et les transporter. Il est évident que plus la roche est fracturée et poreuse, plus les risques de pollution chimique sont importants.

L'étanchéité du site au cours du temps est étroitement liée à la vitesse de transport des éléments et à leur période radioactive

Tout le problème est de savoir combien de temps le site peut contenir les matériaux radioactifs engendrés par une explosion. La distance sur laquelle l'élément chimique peut être transporté au travers de la roche dépend en premier lieu de la vitesse à laquelle l'eau y circule (de quelques centimètres à quelques mètres par an) et du temps nécessaire à la mise en solution de l'élément. Son transport peut se trouver bloqué s'il est piégé dans des phases minérales précipitées à partir de l'eau, ou s'il est adsorbé (c'est-à-dire retenu) à la surface de particules argileuses, produits courants de l'altération des basaltes et des granites. L'étanchéité du site au cours du temps est étroitement liée à la vitesse de transport des éléments polluants par l'eau et à leur période radioactive. Il est facile d'estimer les variations de concentration d'un élément par rapport au point de tir contaminé si l'on connaît la vitesse de transport effective (V_{eff}) de l'élément dans l'eau et son taux de décroissance radioactive. Si l'élément reste en permanence en solution dans l'eau, sa vitesse effective de transport (V_{eff}) est égale à celle de l'eau (V_{eau}). En revanche, s'il est piégé dans un minéral ou adsorbé à sa surface, la vitesse effective sera inférieure à celle de l'eau. Il arrivera en surface avec un retard. La relation $V_{eff} = V_{eau}/R$, où R est une constante de retard, exprime le phénomène⁽²⁾. Nous avons fait le calcul pour le césium 137 et aussi le plutonium 239 (fig. 3).

Quelques commentaires s'imposent. Les points de tir doivent être situés à des profondeurs de mille mètres afin d'éviter au maximum les phénomènes de débordage susceptibles de libérer à l'air libre toute la radioactivité⁽¹⁾. D'après nos calculs, le césium 137, d'une durée de vie de 25 ans, reste confiné dans la roche, quel que soit le cas de figure : quand l'eau partie du point de tir arrive en surface, elle est dénuée de toute radioactivité. Les problèmes arrivent avec le plutonium 239, d'une période radioactive de 25 000 ans. Dissous dans l'eau, il est susceptible de migrer vers la surface. Cependant, si l'on tient compte de sa cinétique de mise en solution, de son piégeage au sein de mi-

néraux précipités ou de son adsorption à la surface de minéraux argileux, le plutonium reste confiné suffisamment longtemps dans le massif rocheux pour perdre sa radioactivité avant d'atteindre l'air libre.

Ces calculs simplistes fournissent des ordres de grandeur raisonnables pour les processus en jeu. Ils n'intègrent pas les éléments polluants formés par la désintégration du plutonium et du césium. Ces processus physico-chimiques gouvernent également la dissémination des produits radioactifs à la surface. Inutile d'évoquer le désastre si ceux-ci atteignent le réseau hydrographique. C'est là une différence fondamentale avec l'océan, où le déplacement de l'eau

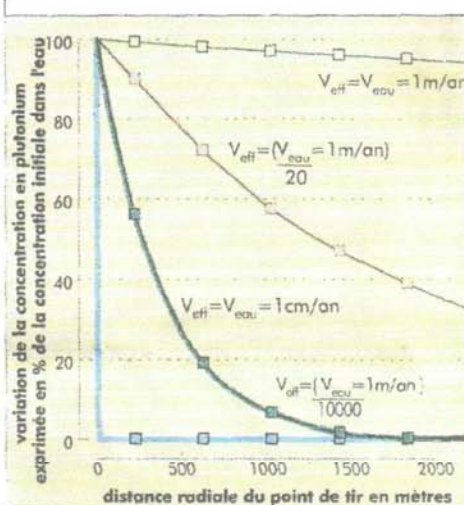


Figure 3. Connaissant la loi de décroissance de la radioactivité d'un élément et la vitesse de transport effective, on peut estimer la distance de dissémination d'un élément radioactif au sein d'un massif rocheux. Cela a été fait pour le césium 137 (demi-vie radioactive de 25 ans) et, ici, le plutonium 239 (demi-vie radioactive de 25 000 ans). Le diagramme exprime la variation de la concentration initiale de plutonium en fonction de la distance du point de tir pour différentes vitesses et des facteurs de retard trouvés dans la littérature⁽²⁾.

(quelques mètres par heure voire quelques centimètres par seconde) assure son mélange et donc la dispersion des particules. L'océan est un réservoir de dilution quasi infini. Ce qui ne signifie pas que le risque soit négligeable. Car même disséminé et dilué, le plutonium peut entrer dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire du plancton. En conclusion aucun site continental, à plus forte raison en France métropolitaine ne paraît propre à accueillir les essais nucléaires souterrains.

P.G. et al. ■

(1) « Les atolls de Mururoo et de Fangataufa », tome II. Les expérimentations nucléaires, CEA/DAM Direction des essais, 1995.

(2) K.B. Kruskopf, *Applied Geochemistry*, vol. 1, 15, 1986.

(3) *ibid.* 1, p. 130.

La Recherche a publié :

(I) « Kobe, les failles d'un séisme », mars 1995.

(II) « Des mouvements en sol majeurs », septembre 1995.