

.b2/15888 (F)

42-242-697

Dept. of External Affairs
Min. des Affaires extérieures

MAY 23 1986

RETURN TO DEPARTMENTAL LIBRARY
RETOURNER A LA BIBLIOTHEQUE DU MINISTERE



Vérification sismique



L'illustration en page couverture symbolise le dialogue permanent sur le contrôle des armements et le désarmement qu'entretiennent les Canadiens entre eux et celui qu'ils établissent avec la communauté internationale.

An English translation of this study is available. To obtain a copy, please contact:

Arms Control and
Disarmament Division
Department of External
Affairs
Tower A, 6th Floor
125 Sussex Drive
Ottawa, Ontario
Canada
K1A 0G2

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1986

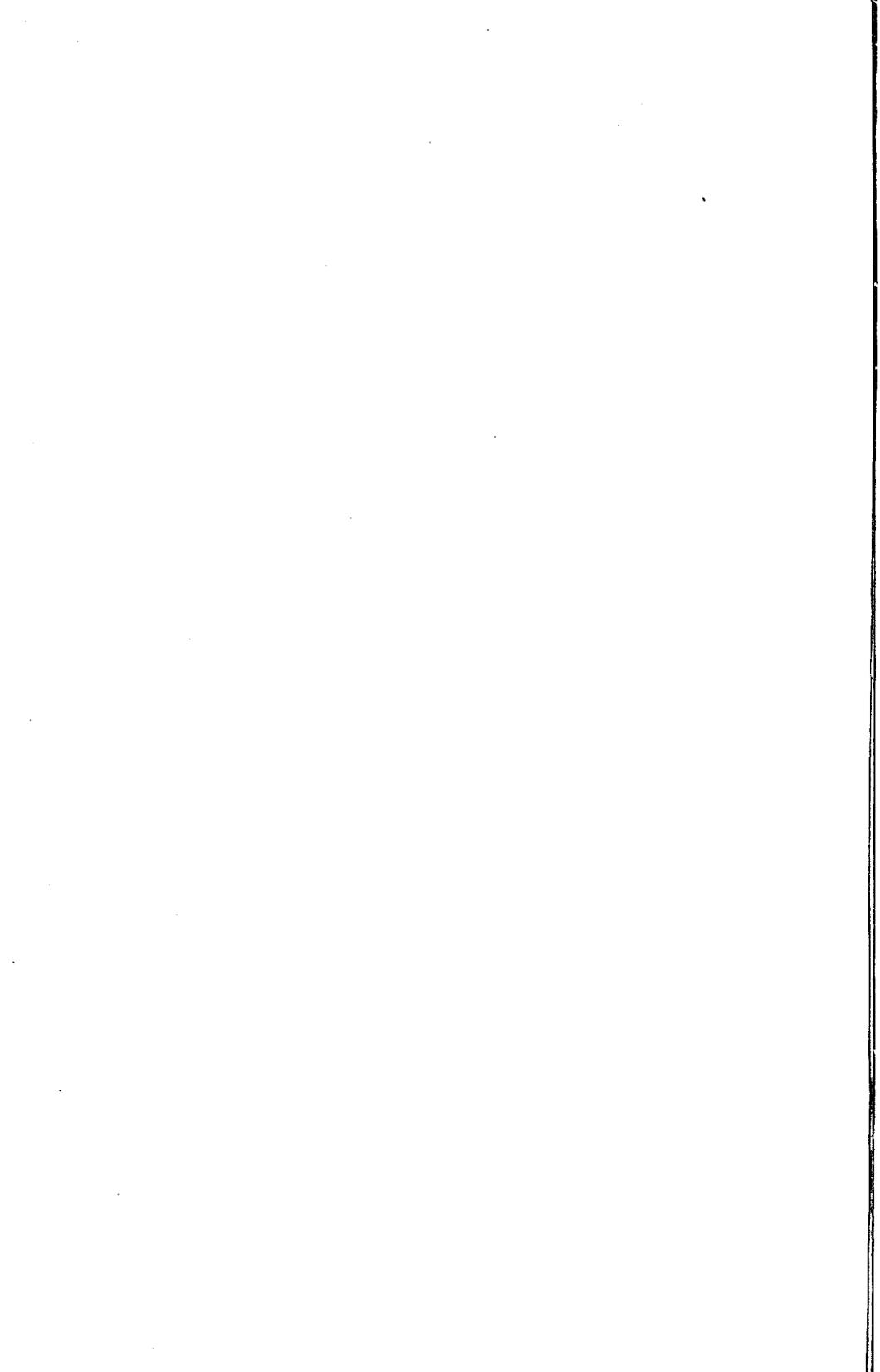
N° de cat. E2-115/1986F

ISBN 0-662-93602-7

ISSN 0830-9248

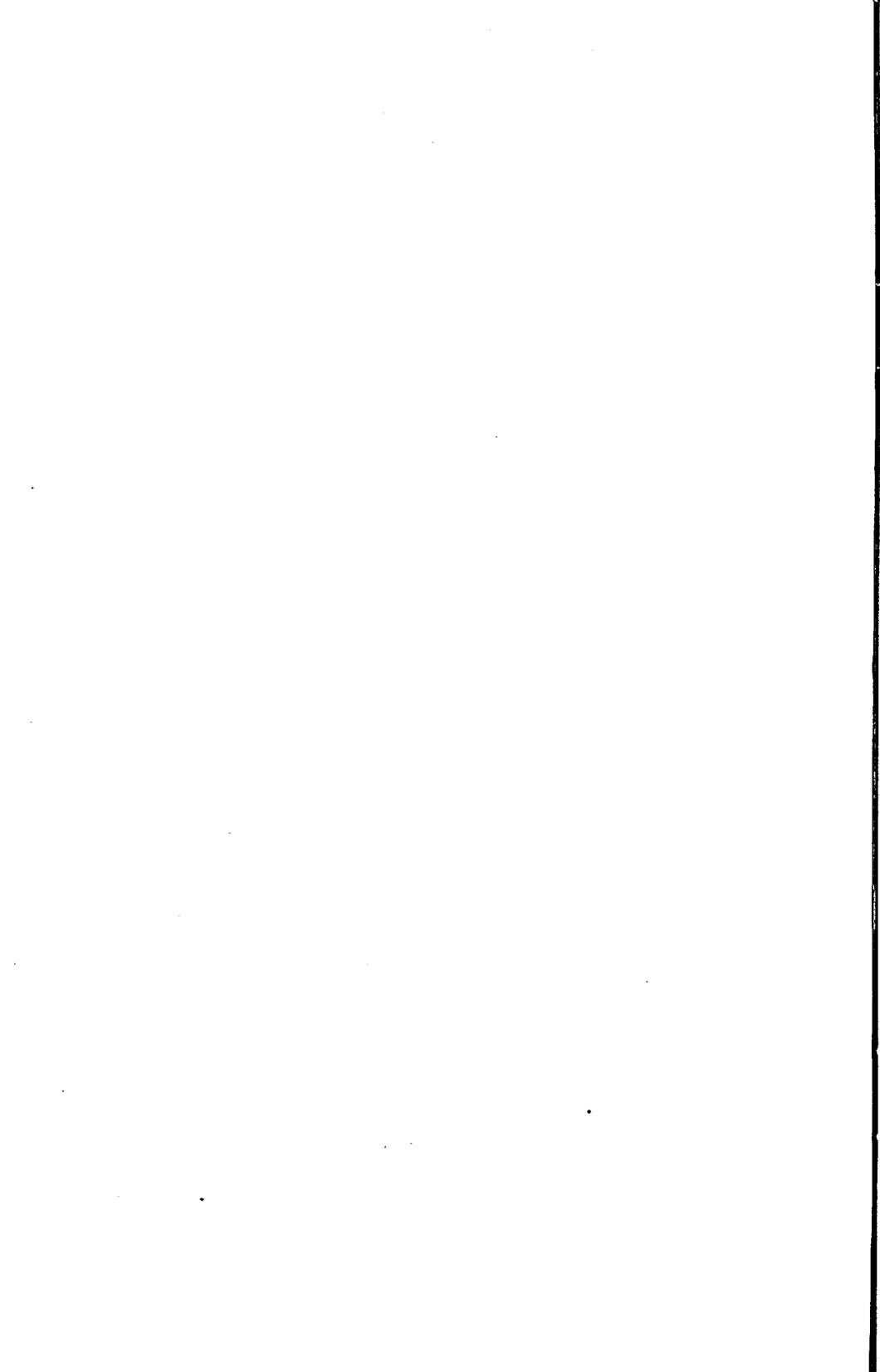
Table des matières

Chapitre premier	Introduction	9
Chapitre deux	Le cadre physique : «La Terre, cette table d'harmonie»	15
	Ondes de volume	16
	Ondes superficielles	20
	«Des signatures différentes»	20
	Détection et identification	21
	Explosions nucléaires à des fins pacifiques	23
Chapitre trois	Historique de la participation canadienne à la vérification sismique	26
	Scientifiques et diplomates	28
Chapitre quatre	Efforts internationaux	33
Chapitre cinq	Échange de données sismiques	35
Chapitre six	Obstacles restants	39
	Dissimulation	40
	Découplage en cavité	40
	Le problème de la discrimination	42
	10 000 chocs par année	42
	Le côté pratique	44
	La tendance aux armes nucléaires plus petites	46
	Une solution: les stations automatiques	46
Chapitre sept	Le chemin qui reste à faire	53
	Le facteur décisif	54



Figures

1	Définition du terme vérification.....	11
2	Le nombre d'explosions nucléaires de 1945 à 1983.....	13
3	Carte des polygones d'essais nucléaires.....	14
4	Coupe transversale de la Terre montrant les chemins d'ondes sismiques	17
5	Le sismographe	18
6	Représentation schématique de l'installation d'un sismographe.....	19
7	Sismogrammes d'ondes de volume et d'ondes superficielles, de périodes courte et longue	22
8	Le nombre d'explosions nucléaires annoncées à des fins pacifiques.....	25
9	Observatoire fédéral à Ottawa	29
10	Ensemble sismologique de Yellowknife (T. N.-O.).....	31
11	Système mondial de télécommunications et participation canadienne à l'Échange international de données sismiques (EIDS).....	37
12	Cavité créée par une explosion expérimentale (projet GNOME de l'USAEC)	41
13	Installations de surface au niveau du sol	43
14	La magnitude sismique en fonction de l'énergie libérée	45
15	La répartition des tremblements de terre à travers le monde.....	47
16	Prototype de station sismologique étatsunienne automatique (boîte noire)	50
17	Regional Seismic Test Network (RSTN)	51
18	Principales étapes des négociations et des initiatives internationales visant à interdire et à réglementer l'utilisation des armes nucléaires.....	55



Introduction

and the local

industry of the

The first part of the report discusses the current state of the industry and the challenges it faces. It highlights the need for a comprehensive strategy to address these challenges and ensure the long-term sustainability of the industry. The second part of the report outlines the proposed strategy, which focuses on improving efficiency, reducing costs, and enhancing the quality of products and services. The third part of the report provides a detailed analysis of the financial implications of the proposed strategy, including a cost-benefit analysis and a risk assessment. The fourth part of the report discusses the implementation plan, including the key milestones and the resources required. The fifth part of the report provides a summary of the findings and conclusions, and offers recommendations for further action.

The industry has experienced significant growth in recent years, driven by increasing demand for its products and services. However, this growth has also led to increased competition and rising costs, which have put pressure on profit margins. In addition, the industry faces a number of challenges, including a shortage of skilled labor, outdated technology, and a changing regulatory environment. To address these challenges and ensure the long-term sustainability of the industry, a comprehensive strategy is needed. This strategy should focus on improving efficiency, reducing costs, and enhancing the quality of products and services. The proposed strategy includes a number of key initiatives, such as investing in new technology, improving the training and development of the workforce, and streamlining operations. The financial implications of the proposed strategy are analyzed in detail, showing that the benefits of the strategy outweigh the costs. The implementation plan is also outlined, showing that the strategy can be implemented over a period of three years. The findings and conclusions of the report are summarized in the final section, and recommendations for further action are provided.

The industry has a long history of success, and it is well-positioned to continue to grow and prosper in the future. However, it must be prepared to face the challenges ahead and take the necessary steps to ensure its long-term sustainability. The proposed strategy provides a clear and actionable plan for addressing these challenges and achieving the industry's goals. It is essential that the industry leadership and stakeholders work together to implement this strategy and ensure its success. The industry has the potential to become a global leader in its field, and it is up to us to make that vision a reality.

The industry is a vital part of the economy, and it plays a key role in providing the goods and services that we need to live and work. It is important that we take the time to carefully consider the challenges it faces and develop a strategy to address them. The proposed strategy is a comprehensive and realistic plan that will help the industry to overcome its challenges and achieve its goals. It is a plan that is based on sound financial principles and a deep understanding of the industry. It is a plan that is designed to be implemented over a period of three years, and it is a plan that is flexible enough to be adjusted as needed. The industry has the potential to become a global leader in its field, and it is up to us to make that vision a reality.

Introduction

Chapitre premier

Peu importe la solidité qu'elle semble parfois avoir, la planète Terre n'est en réalité qu'une gigantesque table d'harmonie. Ainsi, en appliquant des «oreilles» appropriées sur le sol, il est possible de détecter les vibrations causées par des événements importants qui ont pu se produire à 10 000 kilomètres de distance.

Les bruits les plus fréquemment entendus sont d'origine naturelle — les résultats des séismes, le battement des vagues sur des rives lointaines et le bruit causé par les phénomènes météorologiques — mais les humains fournissent aussi leur propre contribution en effectuant des activités quotidiennes comme l'exploitation minière, la construction et l'utilisation des trains et des véhicules motorisés.

Toutefois, le plus retentissant de tous les bruits d'origine humaine reste encore celui qui provient des explosions nucléaires souterraines, lesquelles peuvent produire dans l'écorce terrestre des chocs pouvant être comparés à ceux de séismes assez violents.

Les appareils employés pour déceler de tels événements sont appelés sismographes (ou sismomètres). Ce sont des dispositifs sensibles qui enregistrent à la fois les mouvements verti-

caux et horizontaux de la surface terrestre qui pourraient échapper à la capacité sensorielle des êtres humains. Le sismographe constitue probablement le meilleur moyen de vérifier si les traités interdisant tout essai souterrain d'armes nucléaires sont respectés.

Lorsqu'un nombre suffisamment grand de sismographes bien situés détectent le même phénomène, il est souvent possible de comparer leurs résultats et de déterminer avec un degré relatif de certitude la nature du phénomène à l'origine des ondes de chocs, leur lieu d'origine, leur profondeur sous la surface de la terre et la quantité approximative d'énergie produite.

Figure 1 Définition du terme vérification

«La vérification est l'examen d'une chose de manière à pouvoir établir si elle est conforme à ce qu'elle doit être.» (Le Petit Robert)

Au cours de la décennie 80, aucun autre problème n'aura pris autant de place dans les négociations internationales sur le contrôle des armes et le désarmement que la **vérification**. À une époque où la méfiance et l'incertitude sont particulièrement accrues, il ne faudrait pas croire que les pays signeront des traités affectant leur sécurité nationale sans chercher à s'assurer par quelque moyen que les autres signataires respecteront réellement les termes de l'entente. Autrement dit, la **vérification** est le moyen par lequel une telle assurance sera acquise. Qu'il s'agisse d'employer des mécanismes de consultation, de faire appel à des satellites de reconnaissance photographique ou de procéder à des inspections sur place, la capacité de s'entendre au sujet d'un système effectif de vérification peut faire toute la différence en ce qui concerne le succès ou l'échec des négociations d'une entente sur le contrôle des armes.

Le Canada possède une longue tradition de recherche en géophysique et dans la veille sismique. Les experts canadiens qui ont consacré leur carrière à étudier de telles questions estiment que le Canada doit jouer un rôle particulier dans l'élaboration de systèmes de vérification fiables qui devraient constituer un prérequis essentiel à la conclusion de tout traité sur l'interdiction des essais. La dimension du Canada, sa position géographique (fig. 3), ainsi que sa ressemblance géologique à la grande masse rocheuse continentale sur laquelle repose la plus grande partie du continent eurasiatique, de même que notre propre expertise technique, rendent cet objectif possible.

De telles techniques pourront-elles être perfectionnées au point d'inspirer un degré de confiance raisonnable permettant de paver la voie à une cessation des essais nucléaires?

Les experts canadiens en sismologie qui ont participé aux négociations de Genève sur cette question pendant plusieurs décennies rappellent que le problème est des plus complexes puisqu'il met encore en cause de nombreuses inconnues sur le plan strictement technique.

En outre, ils ajoutent que le problème ne pourra être résolu que dans une atmosphère de bonne foi internationale qui suppose une volonté de la part de toutes les nations de rendre accessibles les données sismiques nationales en plus grande quantité que par le passé. À cet égard, il pourrait aussi se révéler nécessaire d'obtenir des concessions supplémentaires, comme celles qui permettraient l'établissement d'un nombre suffisant de stations d'écoute internationales à l'intérieur des frontières des pays visés.

Dans le cadre des engagements continus du gouvernement visant à tenir les Canadiens informés des diverses questions de contrôle des armes et de désarmement, la présente brochure passe en revue l'état actuel des capacités techniques permettant de surveiller une interdiction des essais souterrains, d'explorer le potentiel d'amélioration de ces capacités et de décrire les contributions canadiennes à cet effort de contrôle des armes.

Figure 2 Le nombre d'explosions nucléaires de 1945 à 1983

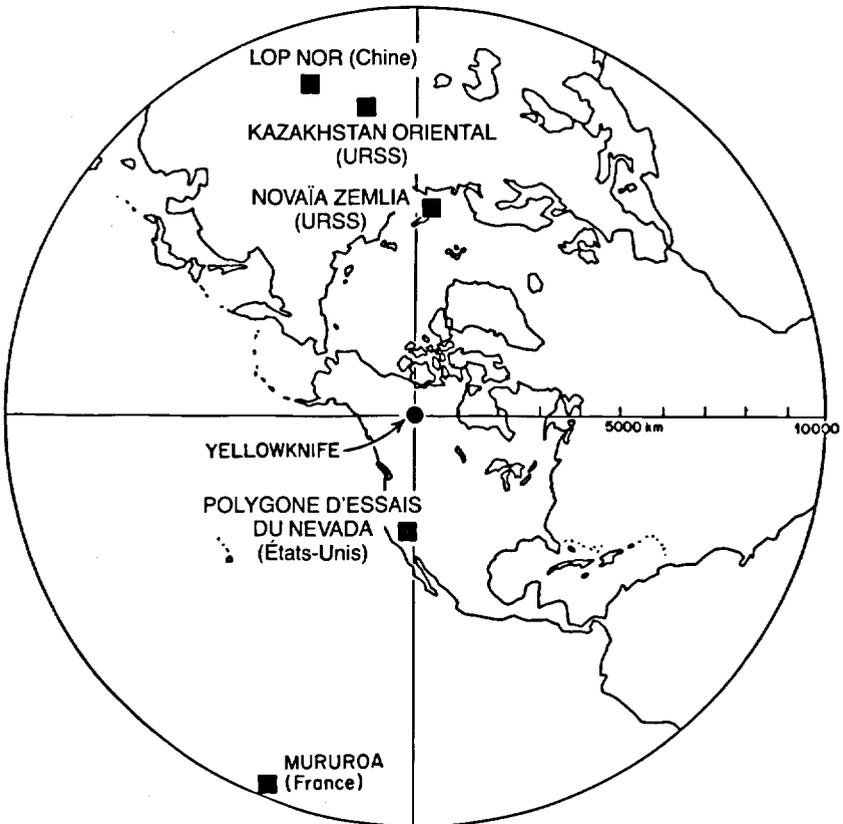
D'après l'Institut suédois de recherche sur la défense, un total de 1 469 explosions nucléaires ont été provoquées sur notre Terre depuis 1945. De ce nombre, 461 ont été effectuées dans l'atmosphère et 1 008 sous terre. Le tableau suivant indique le nombre d'explosions nucléaires par pays :

	Atmosphère	Sous terre	Total
France	45	75	120
Inde	—	1	1
Chine	22	5	27
Union soviétique	161	368	529
Royaume-Uni	21	15	36
États-Unis	212	544	756
	461	1 008	1 469

Le tableau indique que ce sont les États-Unis qui ont procédé au plus grand nombre d'essais nucléaires et qu'ensemble, les deux superpuissances représentent 87 p. 100 du total. Au cours des dernières années, c'est l'URSS qui a mené le plus d'essais nucléaires, même si le nombre total d'essais a été relativement constant à raison de 51 explosions par année en moyenne, soit à peu près un essai par semaine.

Des événements sismiques indiquent que la plupart, sinon toutes les explosions nucléaires d'aujourd'hui, sont effectuées sous terre. La Chine qui n'a pas adhéré au Traité sur l'interdiction partielle des essais s'est livrée à quelques essais dans l'atmosphère, le dernier ayant été mené en octobre 1980. La France non plus n'a pas signé le traité, mais elle a officiellement déclaré qu'elle ne procéderait à aucun essai d'arme nucléaire dans l'atmosphère. Elle n'a procédé à aucun essai de ce type depuis 1974.

Figure 3 Carte des polygones d'essais nucléaires. L'ensemble de Yellowknife est situé dans un rayon de 10 000 km de tous les principaux polygones d'essais d'explosions nucléaires souterraines.



Le cadre physique

«La Terre, cette table d'harmonie»

Chapitre deux

Le cadre physique : «La Terre, cette table d'harmonie»

Pour apprécier l'ampleur du défi que doivent relever les scientifiques dans ce domaine vital du contrôle des armes, il convient de se représenter la Terre que nous habitons sous forme de sphère possédant un rayon approximatif de 6 500 kilomètres et une circonférence d'environ 40 000 kilomètres. Elle comprend trois parties principales : la croûte, le manteau et le noyau (Voir fig. 4).

La discontinuité entre le manteau de la Terre et son noyau liquide constitue un obstacle réel à la transmission de la plupart des ondes sismiques, soit en les réfléchissant vers le haut ou en les faisant obliquer vers le noyau de la Terre. Ainsi, le noyau jette une «ombre» qui empêche les stations à l'écoute de détecter clairement certaines ondes sismiques à des distances dépassant environ 10 000 kilomètres.

Il existe une autre limite qui découle du fait que les différentes formations géologiques transmettent les ondes sismiques avec plus ou moins d'efficacité. Ainsi, les roches granitiques dures et les gisements de sel transmettent comparativement bien les chocs à fréquence élevée, tandis que le tuf (une roche composée de fragments volcaniques) transmet mal les ondes sismiques. Les sédiments, souvent d'origine sa-

blonneuse ou vaseuse, sont encore moins efficaces comme transmetteurs d'ondes sismiques. Par conséquent, l'amplitude enregistrée des ondes sismiques produites par un événement donné, lorsqu'elle est mesurée à une certaine distance, peut varier suivant un facteur de 10, selon le type de terrain sur lequel se produit l'événement.

Lorsqu'un événement sismique se produit à l'intérieur de la Terre par suite d'un tremblement de terre ou d'une explosion souterraine, il engendre différents types d'ondes sismiques, les deux principales catégories étant les ondes de volume et les ondes superficielles.

Ondes de volume

Les ondes de volume voyagent à travers la masse ou manteau de la Terre. L'onde de volume qui se déplace le plus rapidement est l'onde longitudinale P (primaire) qui ressemble plutôt à une onde sonore se déplaçant à travers la masse rocheuse de la Terre. Le second type d'ondes de volume est celui des ondes S ou ondes de cisaillement auxquelles on attribue le nom d'ondes transversales; elles se déplacent à environ 60 p. 100 de la vitesse des ondes P.

Toutes les ondes de volume voyagent à une vitesse propor-

Figure 4. Coupe transversale de la Terre montrant les chemins empruntés par les ondes sismiques. La zone d'ombre est créée par les ondes déviées par le noyau de la Terre. La période de temps qui s'écoule entre l'arrivée des ondes P directes et les ondes P réfléchies par la surface (pP) donne une indication de la profondeur de l'événement sismique.

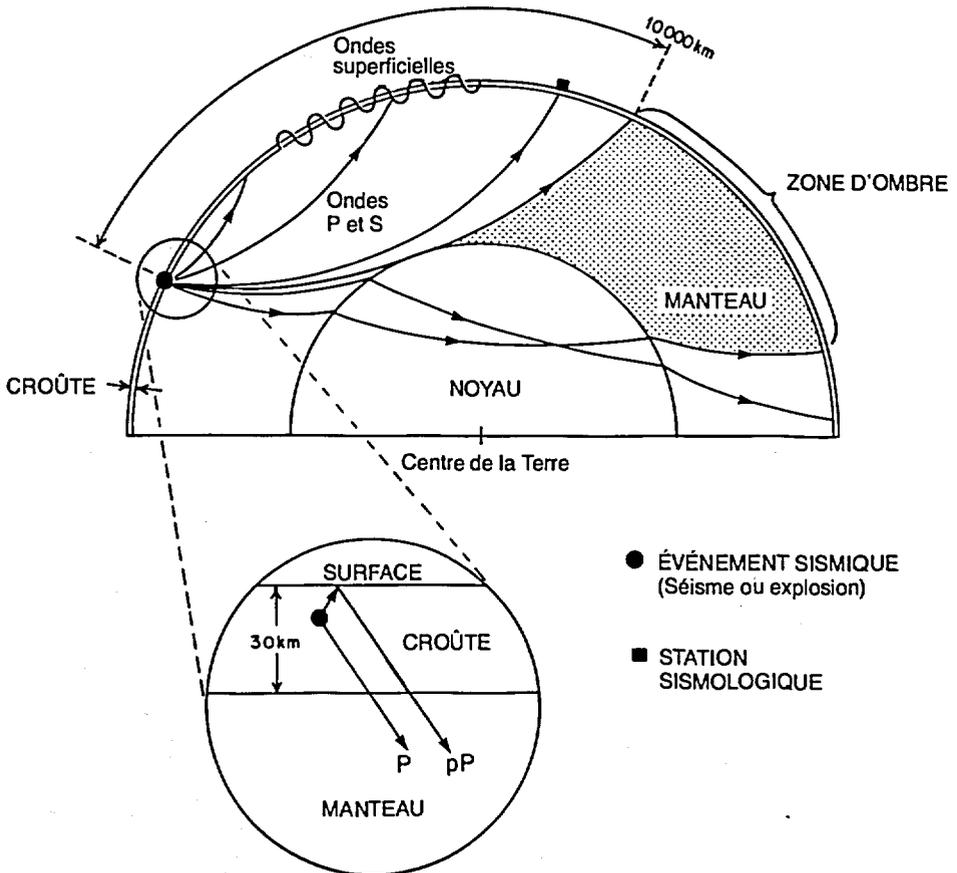


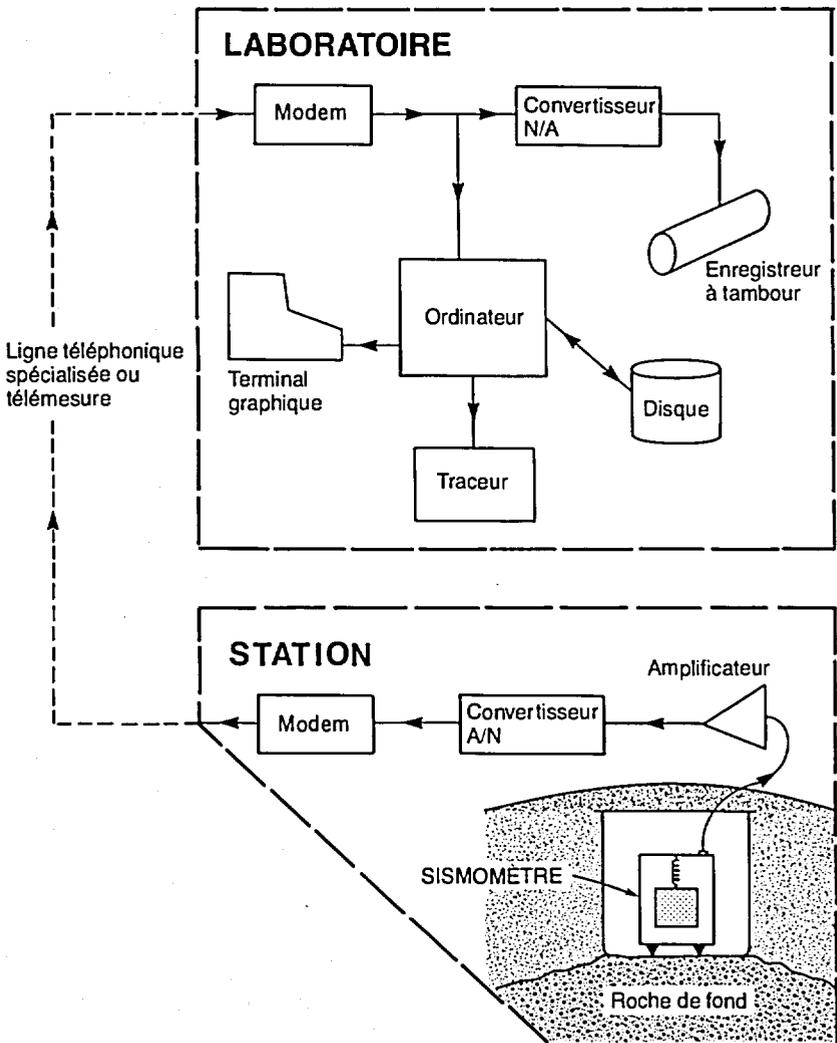
Figure 5 Le sismographe. L'appareil employé pour détecter des ondes sismiques est appelé sismomètre (illustration à la page 19) et il prend habituellement la forme d'une boîte métallique, d'environ 20 centimètres de diamètre et de 30 centimètres de hauteur, munie d'une bobine de fil métallique. À l'intérieur de la bobine, se trouve en permanence un aimant suspendu à partir du sommet de la boîte au moyen d'un ressort et cet aimant peut se déplacer librement de haut en bas.

La boîte métallique, avec sa bobine, est montée directement sur le roc solide et toute vibration de la Terre lui imprimera un mouvement de haut en bas, mais l'aimant, étant quelque peu massif, aura tendance à rester en place. Ce mouvement relatif produira un faible courant électrique dans la bobine et ce courant peut être mesuré et enregistré sous forme d'ondes sur un rouleau de papier en mouvement ou sur un ruban magnétique.

Le courant induit dans la bobine sera proportionnel au mouvement de l'aimant à l'intérieur de la bobine. La période naturelle de vibration du ressort est celle d'une onde P (primaire) moyenne, soit environ une seconde. Toutefois, en réglant l'amplificateur électrique qui enregistre ces mouvements, il est possible d'enregistrer des ondes sismiques dont les fréquences peuvent atteindre 100 cycles par seconde (hertz).

Bien que le sismomètre soit un appareil relativement petit et compact, une installation sismographique peut comprendre un nombre donné de sismomètres, de même qu'un laboratoire d'analyse des données, un ordinateur et du matériel électronique assorti pour numériser les données à des fins d'analyses plus poussées.

Figure 6 Représentation schématique de l'installation d'un sismographe numérique moderne. (N-numérique, A-analogique)



tionnelle à la densité du milieu traversé. Elles ont tendance à adopter le chemin le plus rapide et par conséquent à emprunter des itinéraires profondément enfouis dans la Terre, où les matériaux sont plus denses. Les ondes P ont une période d'environ une seconde. Ce sont ces ondes de volume à fréquence plus élevée qui sont ressenties par les êtres humains et qui causent des dégâts dans une zone soumise à un tremblement de terre violent. Les ondes de volume S, qui peuvent être enregistrées au moyen de sismographes dans le cas des tremblements de terre, sont habituellement absentes ou d'importance négligeable dans le cas des explosions.

Ondes superficielles

Les ondes superficielles, (qui portent aussi le nom d'ondes de Rayleigh, d'après le premier scientifique à en faire la description) se comportent comme des ronds à la surface de l'eau. Elles se déplacent beaucoup plus lentement que les ondes de volume et elles possèdent une fréquence de vibration beaucoup plus basse (les ondes superficielles ont une période d'environ 20 secondes), mais elles jouent un rôle important dans la sismologie de détection, particulièrement lorsque vient le temps d'identifier la source d'un événement.

«Des signatures différentes»

Lorsqu'un choc terrestre de magnitude suffisante se produit quelque part dans la portée d'une station d'écoute donnée, le premier signal qui est enregistré est celui de l'onde de volume P. Il peut être suivi par d'autres ondes P qui empruntent des chemins différents et plus lents, puis, particulièrement dans le cas d'un séisme souterrain de grande profondeur, parce qu'il porte le nom d'ondes pP qui se déplacent d'abord vers le haut avant d'être réfléchies vers le bas par la surface de la Terre.

Peut-être 20 ou 30 minutes plus tard, si le choc est lointain, les ondes superficielles de basse fréquence devraient selon toute probabilité être enregistrées. La différence dans le temps d'arrivée entre les ondes P et les ondes superficielles donne habituellement une estimation approximative de la distance entre le sismomètre et la source de l'événement.

Tandis qu'un tremblement de terre fournit habituellement un assortiment compliqué d'ondes sismiques en raison de la superficie du mouvement géologique en cause, les explosions fournissent des signatures relativement simples. Par conséquent, les ondes créées par des explosions ont tendance à apparaître très différentes des

tremblements de terre aux yeux expérimentés du sismologue. Ainsi, ces ondes d'explosions possèdent habituellement une fréquence supérieure et une durée plus courte. En outre, l'onde de volume P initiale provenant d'une explosion a tendance à être plus grande que celles qui sont causées par des tremblements de terre.

Il est ainsi relativement facile pour un expert de distinguer entre des tremblements de terre et des explosions de grande magnitude. Toutefois, certains problèmes surviennent lorsque vient le temps d'établir des distinctions à de faibles magnitudes. M. Robert North, chercheur principal en sismologie à la Direction de la physique du Globe (Énergie, Mines et Ressources Canada), explique que deux difficultés sont rencontrées dans l'interprétation des enregistrements d'événements plus petits. D'abord, les signaux d'ondes sismiques ont tendance à se laisser engloutir dans le bruit de fond comme ceux qui sont produits par les mouvements de l'océan ou le vent et, en deuxième lieu, les petites explosions et les petits tremblements de terre ont tendance à se ressembler sur les sismogrammes.

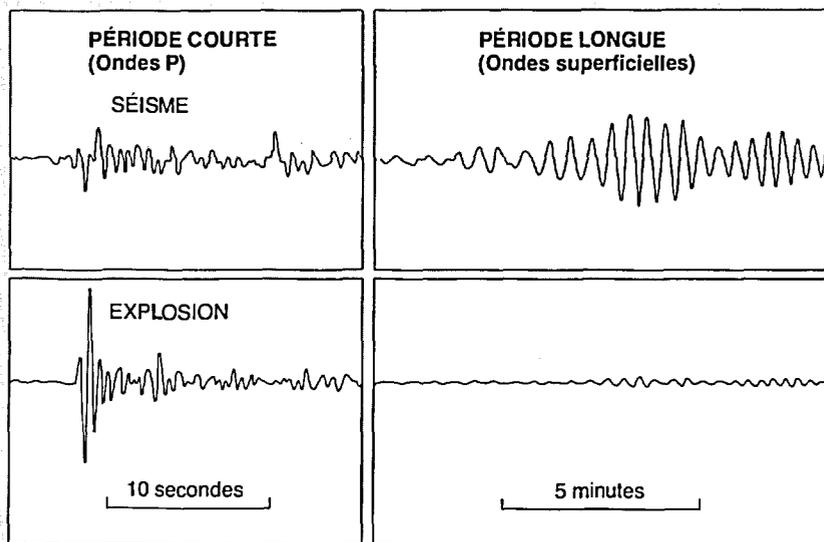
Détection et identification

Tout programme de vérification prévoit deux processus distincts : i) la détection ou la reconnaissance qu'un événement sismique s'est produit et à quel endroit, et ii) la détermination de la nature de l'événement.

Le seuil qui permet aux experts d'avoir confiance en leurs capacités de détecter et d'identifier une explosion nucléaire parmi d'autres bruits microsismiques constitue l'élément-clé en matière de vérification sismique lorsque vient le temps d'élaborer un hypothétique traité, d'après le Chef de la recherche en vérification sismique à la Direction de la physique du Globe (Énergie, Mines et Ressources), le docteur Peter Basham.

Habituellement, un certain nombre de stations enregistrent un événement donné. Plus le nombre de stations est grand, meilleures sont les informations obtenues et, si ces stations sont géographiquement bien situées, il doit alors être possible de déterminer l'endroit approximatif où l'événement s'est produit à 10 ou 30 kilomètres près. Une fois le lieu de l'événement déterminé, il peut être nécessaire de confier à un sismologue une analyse hautement sophistiquée des données afin de déterminer la nature de l'événement, particulièrement si les signaux sont détectés

Figure 7 Sismogrammes enregistrés à la station de Glen Almond (Québec) pour un séisme et une explosion. Les deux événements ont eu lieu en Union soviétique en octobre 1984 à une distance d'environ 8 000 km. Comme l'indiquent les sismogrammes, la différence la plus importante entre les signaux provenant des deux types d'événements est le fait que l'explosion a produit des ondes superficielles beaucoup plus petites.



juste au-dessus du niveau de bruit microsismique.

Il peut aussi être important de déterminer l'énergie libérée dans une explosion, particulièrement si un traité, au lieu d'interdire complètement les essais, fixe un seuil-limite pour l'ampleur des essais. Lorsqu'un événement a été identifié comme étant d'origine nucléaire et que vient le temps de déterminer la quantité d'énergie libérée, des ajustements sont apportés aux lectures sismiques (étalonnage) sur la base des données sismiques antérieurement collectées pour la même région. Idéalement, de telles données devraient être fournies par le pays d'origine; toutefois, il existe un problème du fait que certains pays, notamment les États-Unis, ont fourni une grande quantité de données tandis que d'autres très peu, sinon pas du tout.

L'URSS, par exemple possède son propre réseau sismique national qui sert à détecter les tremblements de terre survenus à l'intérieur de son territoire et dans le cadre du réseau mondial de détection des tremblements de terre. Même si l'Occident a eu accès à certaines de ces données, l'URSS n'a jamais divulgué de données sismiques sur une explosion nucléaire produite à leur polygone d'essais.

Explosions nucléaires pacifiques

En 1976, les États-Unis et l'URSS ont signé le Traité sur les explosions nucléaires pacifiques qui impose aux deux nations de partager les données et l'accès aux sites d'explosion destinés à des fins pacifiques. Par suite de cette entente, les deux superpuissances ont permis la publication d'une bonne quantité de données concernant l'objet de telles explosions. Par exemple, bien que les États-Unis aient cessé d'avoir recours à des explosions nucléaires pacifiques en 1973, on s'en était servi jusqu'alors dans le but de créer des réservoirs potentiels pour les produits pétroliers ou pour explorer les possibilités d'extraction des huiles lourdes. Dans le cas de l'URSS, les objectifs poursuivis étaient notamment les suivants :

- Excavation de canaux de surface;
- Détournement des eaux;
- Création de cavités pour l'entreposage des produits pétroliers et, en une occasion,
- Extinction d'un incendie de puits de pétrole.

En vertu de l'entente, les deux pays ont aussi convenu de partager leurs données relatives à l'énergie dégagée par ces explo-

sions, de même que les données sur le type de roches dans lesquelles l'explosion a été effectuée. De telles informations sont absolument nécessaires pour l'étalonnage et par la suite, le processus général de vérification. Jusqu'à aujourd'hui, ces données ont été rendues facilement accessibles par les États-Unis et il est à espérer que des données analogues seront bientôt rendues accessibles par l'URSS.

Figure 8 Explosions nucléaires pacifiques annoncées (tenues en dehors des polygones d'essais ordinaires).

Année	URSS	États-Unis	Inde
1961		1	
1962		2	
1963		4	
1964		8	
1965		3	
1966	1	7	
1967		4	
1968	1	4	
1969	4	2	
1970	3	1	
1971	7	1	
1972	9		
1973	5	3	
1974	3		1
1975	2		
1976	2		
1977	5		
1978	7		
1979	8		
1980	3		
1981	5		
1982	16		
1983	13		
Total	94	40	1

Historique de la participation canadienne à la vérification sismique

Le présent document est le résultat d'un projet de recherche financé par le Conseil canadien de la recherche en santé et en sécurité (CCRS) et le Centre de recherche en génie civil (CRGC) de l'Université de Sherbrooke. Les auteurs tiennent à remercier les membres du Comité de gestion du projet pour leur soutien et leur collaboration.

Le présent document est le résultat d'un projet de recherche financé par le Conseil canadien de la recherche en santé et en sécurité (CCRS) et le Centre de recherche en génie civil (CRGC) de l'Université de Sherbrooke. Les auteurs tiennent à remercier les membres du Comité de gestion du projet pour leur soutien et leur collaboration.

Le présent document est le résultat d'un projet de recherche financé par le Conseil canadien de la recherche en santé et en sécurité (CCRS) et le Centre de recherche en génie civil (CRGC) de l'Université de Sherbrooke. Les auteurs tiennent à remercier les membres du Comité de gestion du projet pour leur soutien et leur collaboration.

Le présent document est le résultat d'un projet de recherche financé par le Conseil canadien de la recherche en santé et en sécurité (CCRS) et le Centre de recherche en génie civil (CRGC) de l'Université de Sherbrooke. Les auteurs tiennent à remercier les membres du Comité de gestion du projet pour leur soutien et leur collaboration.

Le présent document est le résultat d'un projet de recherche financé par le Conseil canadien de la recherche en santé et en sécurité (CCRS) et le Centre de recherche en génie civil (CRGC) de l'Université de Sherbrooke. Les auteurs tiennent à remercier les membres du Comité de gestion du projet pour leur soutien et leur collaboration.

Le présent document est le résultat d'un projet de recherche financé par le Conseil canadien de la recherche en santé et en sécurité (CCRS) et le Centre de recherche en génie civil (CRGC) de l'Université de Sherbrooke. Les auteurs tiennent à remercier les membres du Comité de gestion du projet pour leur soutien et leur collaboration.

Le présent document est le résultat d'un projet de recherche financé par le Conseil canadien de la recherche en santé et en sécurité (CCRS) et le Centre de recherche en génie civil (CRGC) de l'Université de Sherbrooke. Les auteurs tiennent à remercier les membres du Comité de gestion du projet pour leur soutien et leur collaboration.

Le présent document est le résultat d'un projet de recherche financé par le Conseil canadien de la recherche en santé et en sécurité (CCRS) et le Centre de recherche en génie civil (CRGC) de l'Université de Sherbrooke. Les auteurs tiennent à remercier les membres du Comité de gestion du projet pour leur soutien et leur collaboration.

Chapitre trois

Historique de la participation canadienne à la vérification sismique

Scientifiques et diplomates

Pour améliorer la capacité canadienne en matière de surveillance des essais souterrains, un programme intergouvernemental a été lancé récemment et dans ce programme, la section de vérification et de recherche en matière de désarmement et de contrôle des armes au ministère des Affaires extérieures a fourni les fonds nécessaires à la Direction de la physique du Globe, du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, pour permettre de combler les besoins supplémentaires en personnel et en matériel informatique. Dans le cadre de ce programme, des experts techniques d'Énergie, Mines et Ressources collaborent étroitement avec certains diplomates des Affaires extérieures lorsque vient le temps d'engager des négociations internationales concernant les traités susceptibles de limiter ou d'interdire les essais d'armes nucléaires.

Les responsabilités de la Direction de la physique du Globe comprennent l'exploitation du Réseau canadien de sismologie. Avec les données tirées de ce réseau, la Direction fournit une contribution continue à la surveillance sismique mondiale en partageant les données canadiennes avec les organismes internationaux. Le premier objectif de la Direction est toutefois

de surveiller les tremblements de terre canadiens et d'étudier les risques sismiques au Canada.

Des experts canadiens en sismologie participent à des efforts de contrôle des armes depuis qu'il a été constaté que la sismologie pouvait contribuer à la surveillance des explosions souterraines. Ainsi, en 1958-1959, la Direction de la physique du Globe était représentée au sein d'une conférence d'experts qui s'est réunie à Genève afin de discuter de la possibilité d'exercer une surveillance sismique sur un éventuel traité d'interdiction des essais.

Le docteur Peter Basham, dont le nom est maintenant bien connu dans la documentation scientifique qui porte sur les questions de sismologie, se souvient que l'événement d'une importance particulière qui a amené les experts d'un peu partout dans le monde à se réunir a été le premier essai souterrain enregistré d'un engin nucléaire au Nevada en 1957. Ses réverbérations ont été détectées par des sismographes à une bien plus grande distance que prévu.

Figure 9 Bâtiment de l'Observatoire fédéral situé sur l'avenue Carling à Ottawa, qui abrite maintenant la Direction de la physique du Globe (ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources).



Bien que des négociations se soient déroulées entre les États-Unis et l'Union soviétique à la fin des années 50, la réunion d'experts tenue à Genève en 1958 a constitué la première rencontre d'importance entre l'Est et l'Ouest pour discuter de vérification sismique sur le plan technique. Les participants à cette réunion en sont venus à la conclusion qu'un traité sur l'interdiction des essais souterrains pouvait être surveillé par les efforts combinés de quelque 150-170 stations sismologiques réparties à travers le monde.

Les stations en service à ce moment ont dès lors été consacrées uniquement à la détection des tremblements de terre et les recherches ont commencé immédiatement afin de déterminer le type de sismographe amélioré qui pourrait servir à surveiller un hypothétique traité sur l'interdiction des essais.

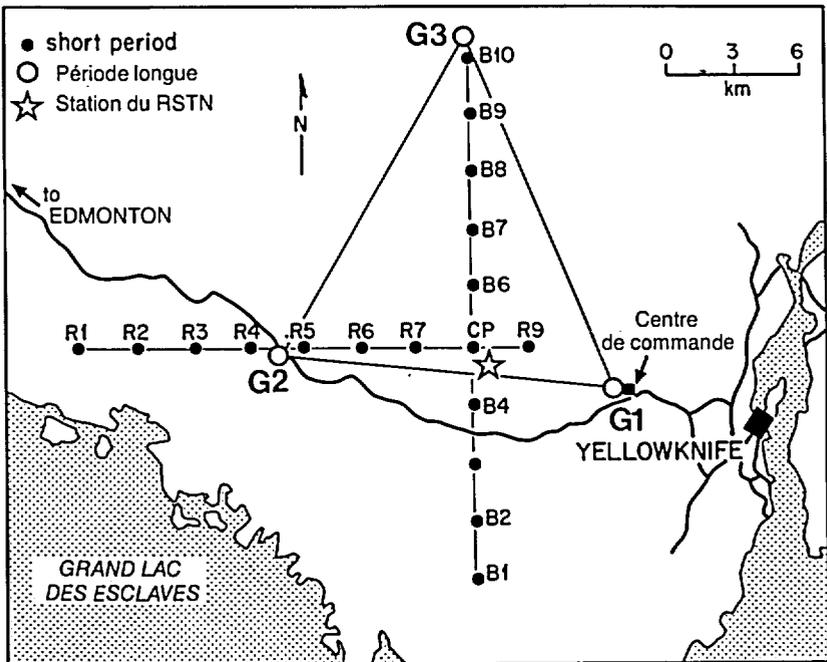
Le Royaume-Uni a été le premier à prendre le départ. La *UK Atomic Energy Authority* a commencé ses expériences par l'essai d'ensembles sismologiques cruciformes, faisant essentiellement appel à la théorie alors en voie d'élaboration concernant les antennes de radio pour détecter les ondes sismiques. Ces ensembles pouvaient être «orientés» électroniquement afin de ré-

duire le bruit microsismique et d'améliorer la qualité de détection. Ils pouvaient aussi donner une direction et une distance approximatives (et, partant, le lieu) d'un événement sismique.

Au début des années 60, les Britanniques ont construit quatre de ces ensembles, qui sont encore tous en service, en Écosse, en Inde, en Australie et dans les Territoires du Nord-Ouest (Canada) près de Yellowknife. L'appareil de Yellowknife comprenait 19 sismomètres et possédait quatre rangées, d'une longueur d'environ 10 kilomètres chacun.

L'ensemble original de Yellowknife était administré par la Commission canadienne de recherche sur la défense jusqu'en 1962, année où les responsabilités ont été transmises au ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources. L'appareil a été amélioré considérablement avec les années et il est maintenant informatisé. Il forme une partie relativement petite mais importante d'un réseau continental de stations sismologiques canadiennes dont le nombre dépasse aujourd'hui la centaine.

Figure 10 Ensemble sismologique de Yellowknife (T. N.-O.). Les sismomètres à période courte, situés à des intervalles de 2,5 km, forment une croix irrégulière; les sismomètres à période longue forment un triangle d'environ 16 km de côté. Les données sismiques provenant des sismomètres sont transmises au centre de commande du *Regional Seismic Test Network (RSTN)* à Albuquerque (Nouveau-Mexique) par télémesure.



La documentation scientifique révèle qu'au cours de ces premières années, le petit groupe d'experts canadiens a apporté une contribution appréciable à la compréhension générale de ce que supposent d'efforts la détection et l'identification sûres des événements sismiques lointains. Au cours des 10 dernières années, les recherches effectuées par ce groupe ont été de plus en plus inspirées par des discussions internationales hautement techniques concernant la vérification d'un traité d'interdiction des essais. Ces discussions sont menées surtout à Genève, avec des scientifiques d'Énergie, Mines et Ressources qui agissent pour le compte du ministère des Affaires extérieures.

Comme indication de l'intérêt porté par le Canada à la réalisation d'un traité effectif d'interdiction des essais, on peut noter son parrainage à l'Assemblée générale des Nations Unies, vers la fin des années 60, d'une résolution-clé demandant à tous les pays de remettre à l'ONU leurs données concernant les possibilités de leurs observatoires sismiques respectifs, de telle sorte qu'une évaluation puisse être effectuée concernant leur capacité de contribuer à un réseau de surveillance de l'interdiction des essais. De grandes quantités de documents ont été acheminées

au siège de l'ONU, à New York, où on a procédé à leur analyse avec l'aide de Canadiens. Une étude effectuée par Basham et Whitham, qui sont au service de la Direction de la physique du Globe, dresse un bilan des résultats obtenus et, en conclusion, les auteurs constatent qu'avec le réseau qui existait, la probabilité de détecter un événement sismique d'une magnitude de 4,5 à l'échelle Richter dans l'hémisphère Nord, était de 90 p. 100. Toutefois, la confiance était beaucoup moins grande en ce qui concerne la capacité de déterminer correctement si le même événement était un tremblement de terre ou une explosion. Un événement d'une telle magnitude équivaldrait à la détonation de 3-10 kilotonnes d'explosifs en milieu de roches dures.

Dans l'hémisphère Sud, formé à 85 p. 100 d'océans, la capacité serait beaucoup moins grande en raison de la rareté des bonnes stations sismologiques. Le rapport canadien contenait un certain nombre de recommandations quant à la façon d'améliorer cette capacité de détection tandis que d'autres études ont porté sur les moyens d'améliorer les estimations de l'ampleur des événements lointains.

Efforts internationaux

Le Comité international de la Croix-Rouge a été créé en 1864, à la suite de la conférence internationale de Genève sur les blessés de guerre. Son mandat est de promouvoir et de surveiller le respect du droit international humanitaire, en particulier des Conventions de Genève de 1949 et de leurs Protocoles additionnels de 1977. Le CICR agit en tant qu'intermédiaire neutre et impartial entre les parties à un conflit armé, afin de soulager la souffrance des victimes et de promouvoir le respect du droit international humanitaire.

Le CICR est financé par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers. Ses activités sont financées par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers. Ses activités sont financées par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers.

Le CICR est financé par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers. Ses activités sont financées par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers.

Le CICR est financé par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers. Ses activités sont financées par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers.

Le CICR est financé par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers. Ses activités sont financées par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers.

Le CICR est financé par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers. Ses activités sont financées par des contributions volontaires de gouvernements, d'organisations non gouvernementales et de particuliers.

Chapitre quatre

Efforts internationaux

En 1976, la Conférence du Comité du désarmement, à Genève, a donné son premier mandat au Groupe d'experts scientifiques. On leur a demandé de préciser les éléments techniques d'un éventuel système international d'échange de données sismiques et de fournir des résultats et des analyses factuelles concernant les méthodes d'échange des données.

Les mots-clés ici sont «échange international de données sismiques». Il est également important de bien s'entendre sur ce que le mandat ne renferme pas. Ainsi, le Groupe n'a pas pour but de concevoir ou de mettre au point un système international visant à surveiller le respect d'un hypothétique traité. Son objectif est bien plutôt de faciliter la vérification par un État intéressé, grâce à un échange coopératif de données sismiques pertinentes.

En d'autres termes, ce que le Groupe de Genève a fait depuis 1976, c'est de discuter des moyens techniques et sismologiques permettant de réaliser un tel échange de données parmi les pays participants. Le système, tel qu'il est conçu actuellement, rend les données accessibles à n'importe quel pays participant qui le désire. La vérification demeure une responsabilité nationale.

Les membres du Groupe d'experts scientifiques se rencontrent à Genève pendant deux semaines deux fois par année. Par suite de leurs initiatives, des expériences internationales ont été menées en 1980, 1981 et 1984 afin d'éprouver et d'améliorer un élément-clé de la surveillance mondiale, celui de l'échange rapide de données entre les nations. L'expérience d'Échange international de données sismiques qui a été menée sur une base mondiale au cours des deux mois allant du 15 octobre au 15 décembre 1984 est de loin la plus importante des expériences menées à ce jour.

Chapitre cinq

Échange de données sismiques

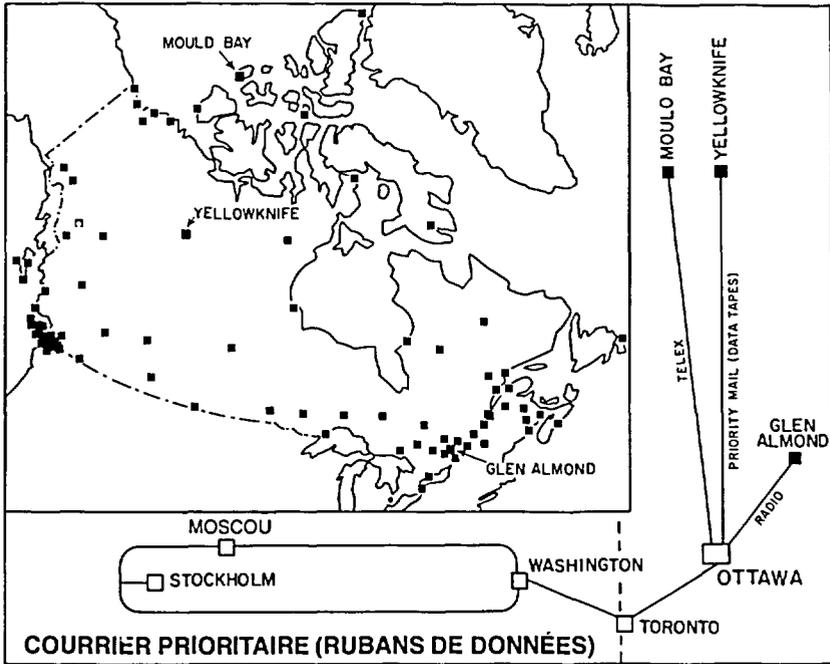
Comme dans le cas des expériences organisées par le Groupe d'experts scientifiques en 1980 et 1981, les résultats de l'expérience d'Échange international de données sismiques de 1984 ont fait ressortir l'importance d'une communication à la fois fiable et rapide. Le réseau de transmission employé a été celui de l'Organisation météorologique mondiale, qui porte le nom de Système mondial de télécommunications. À l'origine, cette liaison de données était simplement destinée à l'échange international de données météorologiques, mais l'Organisation météorologique mondiale permet depuis une dizaine d'années de s'en servir à «d'autres fins environnementales». Dans un tel contexte, six pays ou plus ont pris l'habitude de s'en servir pour l'échange de données sismiques à des fins de surveillance mondiale des tremblements de terre.

Compte tenu de la quantité de données considérées, certaines craintes ont été exprimées à l'effet que le Système mondial de télécommunications en viendrait à ployer sous le poids des données supplémentaires qui sont produites à l'occasion d'une expérience sismique mondiale donnée. Toutefois ceci ne s'est pas produit, en partie parce qu'on a su restreindre le trafic sismique aux heures creuses.

Le programme pour l'expérience a été très bien planifié par le Groupe des experts scientifiques et une tentative a été faite pour amener le plus grand nombre possible de pays à y participer. Trois États, les États-Unis, l'URSS et la Suède, ont accepté de laisser leurs installations nationales de calcul sismique servir de centres internationaux de données expérimentales. Une trentaine de pays et plus de 70 stations sismologiques ont participé à l'expérience.

Chacune des stations a essayé de mesurer certains paramètres qu'il était convenu d'enregistrer au moyen de leurs appareils pour tous les événements sismiques. Ces données ont ensuite été transmises sous forme codée en empruntant le Système mondial de télécommunications. Les centres internationaux de données situés à Moscou, Stockholm et Washington ont reçu ces données et ont produit des bulletins d'événements sismiques. Ces bulletins ont été transmis aux États participants dans les cinq jours suivants.

Figure 11 Système mondial de télécommunications et participation canadienne à l'Échange international de données sismiques de 1984. Les stations sismologiques canadiennes sont indiquées en noir; les trois stations de droite ont contribué à l'échange expérimental de données.



Parmi les 100 stations sismologiques et plus que le Canada exploite, trois d'entre elles ont été retenues pour l'expérience. Il s'agit des stations de l'ensemble de Yellowknife, de celles de Glen Almond (Québec) à une cinquantaine de kilomètres au nord-est d'Ottawa et de celles de Mould Bay dans l'Arctique canadien.

L'expérience avait, entre autres, comme objectif important de déterminer la quantité de données mises en circulation dans l'ensemble du réseau et la quantité de données perdues. Le Canada a tenu ses propres statistiques sur l'expérience et il a participé à une évaluation internationale faite par le Groupe d'experts scientifiques à Genève. Il est possible d'apprécier l'ampleur de la contribution générale du Canada si l'on sait que ses trois stations ont fourni entre 10 et 15 p. 100 de l'ensemble des données recueillies à partir de quelque 70 stations.

Même si de grands progrès ont été réalisés au cours des 10 ou 15 dernières années, particulièrement en ce qui concerne l'analyse informatisée et en temps réel des données, les résultats préliminaires de cette vaste opération couronnée de succès montrent qu'il reste encore beaucoup de chemin à faire dans l'application des plus récentes techniques de traite-

ment des données pour manipuler les énormes quantités d'informations qui seraient produites sur une base quotidienne par un système international d'échange de données de ce type.

Obstacles restants

1970-1971

1972-1973

Chapitre six

Obstacles restants

Dissimulation

La capacité de détection d'un réseau sismographique dans une zone donnée dépend fortement de la force des signaux reçus et du niveau de bruit micro-sismique.

Il ne faut pas oublier non plus que la détection et l'identification des explosions souterraines peuvent souvent être déjouées ou gênées par plusieurs méthodes de dissimulation possibles :

- Signaux sismiques maintenus sous le niveau de «bruit» microsismique;
- Essais pratiqués dans une zone propice aux tremblements de terre ou bruits pseudo-normaux créés en même temps que l'explosion pour masquer celle-ci;
- Polygone choisi de telle manière que le signal traverse une région absorbante de la croûte terrestre, ou
- «Découplage» partiel ou complet de l'explosion à partir de son milieu environnant solide immédiat, en faisant détoner l'engin dans une vaste caverne artificielle.

Même en supposant l'établissement d'un vaste réseau sismographique à l'intérieur de l'URSS, il faut accepter que la

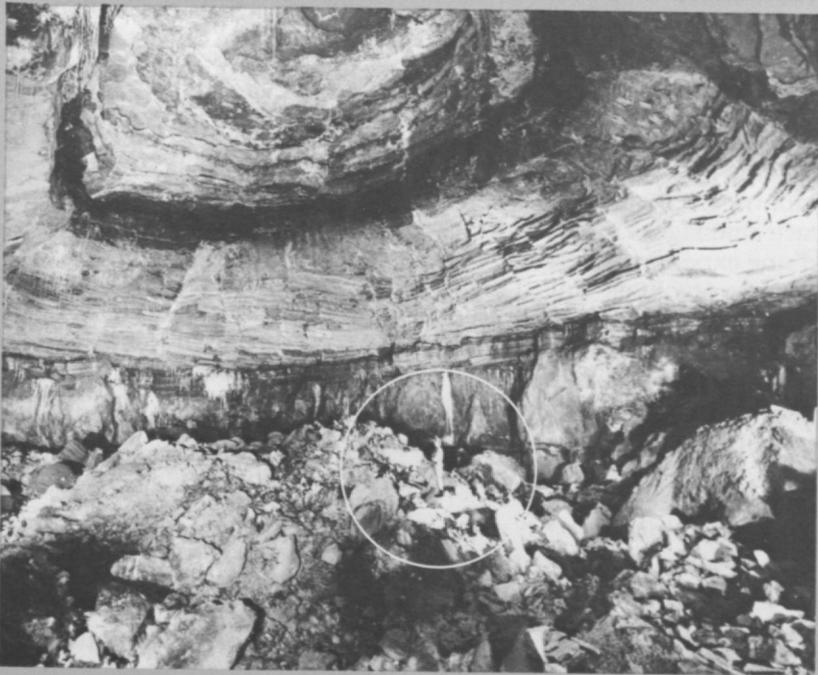
détonation d'un engin d'une puissance de 0,1 kilotonne équivaut à seulement 100 tonnes d'explosifs chimiques, et qu'elle passera probablement inaperçue, même sans recours à un subterfuge. Grâce à une certaine manipulation, comme le découplage en cavité (dont il est question ci-dessus), ce chiffre pourrait être multiplié par un facteur situé entre 50 et 100, ce qui donnerait alors l'impression que l'engin soumis à des essais est cent fois plus petit qu'il ne l'est en réalité.

Découplage en cavité

Les États-Unis ont été le premier pays à signaler le phénomène de découplage en cavité. Dans les années 60, ils ont procédé à de grands essais nucléaires et chimiques dans des dômes de sel souterrains, et les résultats obtenus permettent de croire qu'une cavité de 50 mètres de rayon pourrait étouffer complètement le bruit d'une explosion de cinq kilotonnes.

Une telle technique pourrait étouffer complètement le bruit d'une explosion plusieurs fois plus grande si la cavité était créée dans un matériau plus dur, le granit par exemple. Comme une seule cavité souterraine et sphérique d'une si grande dimension serait difficile à creuser sans tôt ou tard risquer qu'elle ne s'effondre en raison de l'endommagement

Figure 12 Cavité créée par une explosion expérimentale (Gnome) de l'US Atomic Energy Commission (USAEC); l'explosion a eu lieu à 1 200 pieds sous terre, le 10 décembre 1961. La cavité mesurait 160-170 pieds de diamètre sur 60-90 pieds de profondeur et elle a été formée par une détonation nucléaire d'une puissance approximative de 3 kilotonnes. (Courtoisie du Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, Californie).



causé à la roche environnante, il existe un moyen de contourner cette difficulté et ce moyen, qui a été employé avec succès par le passé, consiste à accroître la dimension effective de la chambre en la reliant à un réseau de galeries.

Certains pays ont suggéré d'exercer une surveillance par satellite comme moyen complémentaire d'assurer le respect d'un traité d'interdiction des essais nucléaires, or, il faut préciser ici que les signes extérieurs et visibles laissés par le découplage en cavité ne révéleraient probablement pas grand-chose à un satellite. La photographie aérienne ci-jointe montre des installations de surface aménagées à l'occasion d'une expérience nucléaire souterraine aux États-Unis, l'image ressemble à s'y méprendre à une exploitation minière classique ou tout simplement à d'autres activités de la grande industrie.

Le problème de la discrimination

Une fois que des ondes sismiques ont été détectées, il faut ensuite déterminer si elles proviennent d'un tremblement de terre, d'une explosion chimique ou d'une explosion nucléaire. Les facteurs déterminants sont notamment le lieu et la profondeur sous la surface du sol, compte tenu du fait que la li-

mite actuelle des possibilités de forage utile se situe à environ 10 ou 15 kilomètres de profondeur.

Le lieu à la surface est aussi important; les événements sismiques qui se produisent à des endroits comme le fond de l'océan ne sont sûrement pas des explosions d'origine anthropique.

Il faut aussi se souvenir que de nombreuses régions peuvent sembler inactives sur le plan sismique parce que les événements à forte magnitude ne s'y produisent que très rarement. Toutefois, ces zones peuvent être très actives en ce qui concerne les événements de magnitude plus faible. Ainsi, certaines parties du Canada et des États-Unis peuvent n'enregistrer qu'un seul tremblement de terre de magnitude 4,5 à l'échelle Richter par décennie, tout en entretenant une moyenne d'un choc par jour dans l'intervalle de 2,0-3,9 à l'échelle Richter, ce qui passerait inaperçu sur les enregistreurs, sauf ceux des réseaux locaux. On peut présumer qu'il en va de même pour les nombreuses régions granitiques de l'URSS.

10 000 chocs par année

De manière générale, il faut 0,5 de magnitude Richter supplémentaire (ce qui équivaut à tri-

Figure 13 Vue d'ensemble des installations de surface au niveau du sol après l'explosion expérimentale Gnome, le 11 décembre 1961, Carlsbad (Nouveau-Mexique). (Courtoisie de Borden, Reynolds Electrical & Engineering Company Inc.)



pler la force du choc, voir figure 14), au-dessus du seuil de détection, avant de pouvoir affirmer qu'un événement donné est une explosion. Comme environ 10 000 tremblements de terre de magnitude supérieure à 4 à l'échelle Richter se produisent autour du Globe tous les ans en plus des milliers et des milliers d'événements plus petits, le processus d'identification constitue un défi de taille.

La violence d'un événement sismique est habituellement exprimée au moyen d'une échelle sans limites fixes, qui porte le nom de son inventeur, Charles Richter, et dans laquelle chaque chiffre consécutif de l'échelle correspond à un facteur ajouté de 10 dans l'ampleur de l'événement.

Pour un seuil hypothétique de 2,7 à 3,2 à l'échelle Richter et un réseau de 25 à 30 stations sismologiques régionales déployées par consentement réciproque à travers les États-Unis et l'URSS, seulement 80 p. 100 de tous les événements enregistrés entreraient probablement dans les catégories d'origine nucléaire ou naturelle. Ceci laisse donc beaucoup de place aux fausses alarmes et à la possibilité que si des essais nucléaires d'une très petite portée ou d'une portée inférieure à

une kilotonne étaient menés, ils pourraient bien ne pas être identifiés.

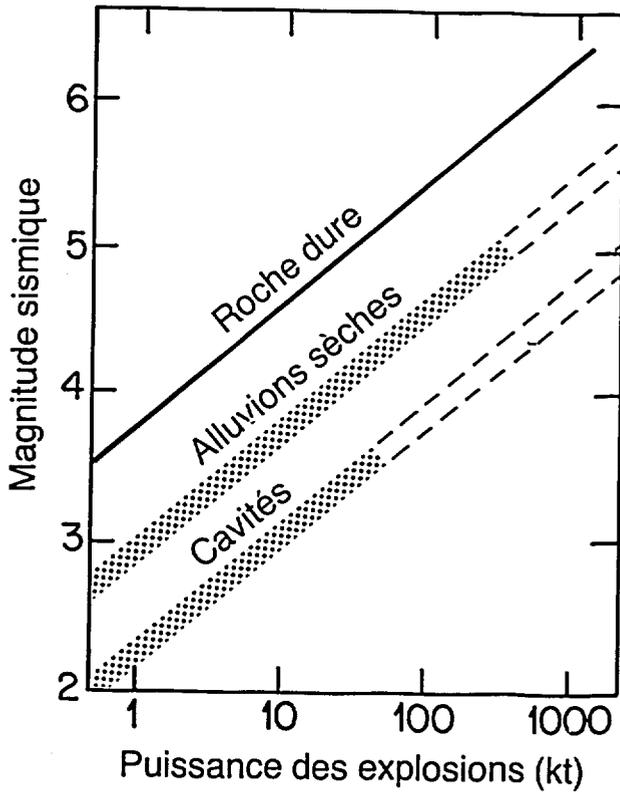
Sur la base de ce genre d'incertitudes, certains spécialistes estiment qu'il est impossible d'en venir à un traité à la fois complet et vérifiable concernant l'interdiction des essais. Ces critiques déclarent qu'aucune des technologies de surveillance envisagées actuellement ne peut offrir l'assurance absolue que des explosions nucléaires illicites de très petite puissance ne passeront pas inaperçues.

Cette lacune dans la capacité de détection et d'identification met en évidence la nécessité de mettre l'accent sur l'organisation de réseaux de détection suffisants à l'intérieur même du pays et souligne le bien-fondé de dispositions prévoyant des inspections sur place.

Le côté pratique

Les scientifiques ne manquent jamais de rappeler que bien avant la détection et l'identification des essais souterrains avec une certaine précision, il existe une autre grande considération : *le côté pratique*. Il n'est pas exagéré de prétendre que, dans la portée d'une station sismologique donnée, des milliers d'événements se produiront au

Figure 14 Magnitude sismique en fonction de la puissance des explosions pour différentes formations géologiques d'après des données qui proviennent du polygone d'essais du Nevada. Comme l'indique la figure ci-dessous, il faut environ dix fois plus de puissance pour produire une onde de choc d'une unité supérieure sur l'échelle Richter.



cours d'une année. D'après le docteur Basham, il serait impensable de chercher à les contrôler et à les analyser tous, puis à réanalyser les événements suspects en tenant compte de données complémentaires provenant d'autres sources. Mais à ce moment, nombre de scientifiques font aussi remarquer que, si l'atteinte d'un tel objectif pouvait décourager d'autres essais d'armes nucléaires, elle en vaudrait bien la peine.

La tendance aux armes nucléaires plus petites

L'importance de bien surveiller les essais d'engins de moindre puissance doit être considérée en fonction de trois progrès importants réalisés récemment en technologie avancée des armements :

- La précision accrue qui est obtenue par les missiles nucléaires — cette précision a atteint un point tel que des explosions de plus faible puissance pourraient assurer la destruction de cibles précises;
- Les très petites armes nucléaires (équivalant à quelques tonnes d'explosifs chimiques) deviennent de plus en plus intéressantes pour ceux qui aimeraient se servir d'armes nucléaires en situation pu-

rement tactique de champ de bataille, avec un minimum de risques pour les civils du secteur et un minimum de perturbations pour l'environnement; et

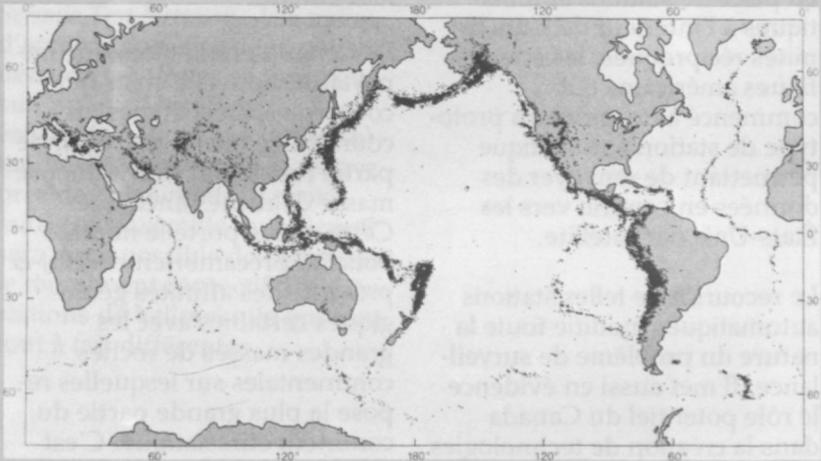
- La recherche continue de mécanismes de déclenchement nucléaire à la fois plus petits, plus efficaces et plus économiques.

Bien que l'importance militaire de ces très petits essais nucléaires soit une question au sujet de laquelle le débat se poursuit, la plupart des experts semblent convenir qu'il serait relativement facile pour un pays donné de les essayer sans craindre la détection. Les essais seraient même plus faciles à réaliser dans les pays où les flux et les mouvements d'informations sont strictement contrôlés et où il existe de vastes zones d'habitat dispersé.

Une solution : les stations automatiques

Les discussions et les expériences qui sont menées tous les ans depuis 1976 par le Groupe d'experts scientifiques s'appuient toujours sur l'emploi de données généralement disponibles grâce au réseau sismologique mondial. Les discussions tenues entre le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS au cours de la période 1976-1980 ont indiqué une volonté de la

Figure 15 Répartition des tremblements de terre dans le monde entier (de magnitude supérieure à 4,5) sur une période de 7 ans.



part de ces pays de permettre la mise en place de certains dispositifs automatiques, appelés parfois «boîtes noires», à l'intérieur même de leurs territoires. Une fois intervenu entre les États-Unis et l'URSS un accord de principe concernant la mise en place de stations automatiques à l'intérieur de leurs limites réciproques, les scientifiques américains ont commencé à imaginer un prototype de station automatique permettant de renvoyer des données en continu vers les États-Unis par satellite.

Le recours à de telles stations automatiques modifie toute la nature du problème de surveillance. Il met aussi en évidence le rôle potentiel du Canada dans la création de technologies appropriées à cette nouvelle situation. La question-clé est maintenant de savoir : comment est-il possible de bien surveiller des événements dont on peut maintenant s'approcher?

Comme Peter Basham s'empresse de le faire remarquer, la réponse n'est pas toute simple. Une onde sismique qui a voyagé sur une grande distance à travers le manteau de la Terre, même si elle a perdu une partie de sa force pendant sa course, possède une signature sismique relativement simple. Par contre, un choc qui n'a voyagé que sur

500 à 1 000 kilomètres peut avoir une forme d'onde complexe, parce qu'il aura rencontré dans la croûte terrestre une myriade de complexités locales qui engendrent des signaux faibles mais qu'il est tout de même possible d'enregistrer localement.

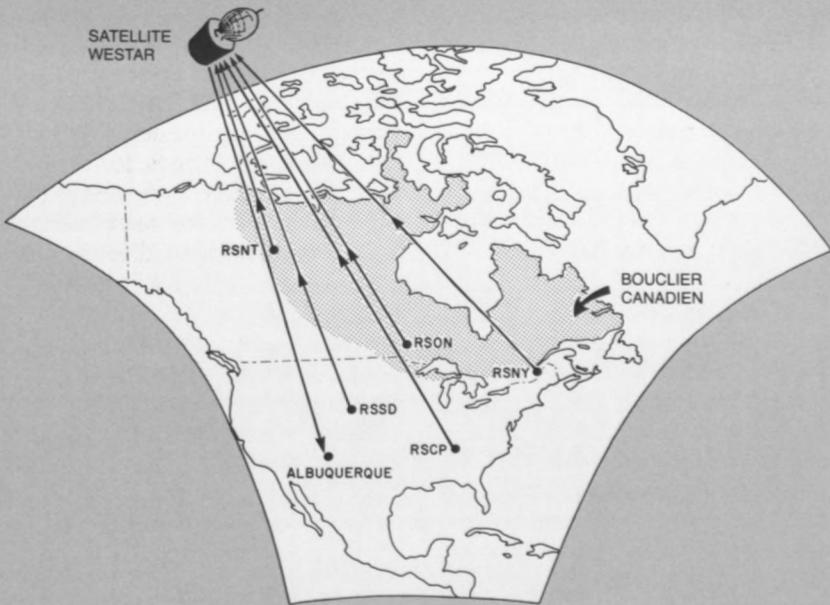
Le Canada prend alors une importance nouvelle en ce qui concerne les recherches en cours parce que sa plus grande partie repose sur une immense masse de roches anciennes. Cette masse porte le nom de bouclier précambrien et celui-ci présente des affinités géologiques certaines avec les grandes masses de roches continentales sur lesquelles repose la plus grande partie du continent eurasiatique. C'est ainsi que le Canada, du point de vue géophysique, ressemble à l'URSS et constitue de ce fait un champ d'expérimentation permettant d'en apprendre beaucoup au sujet des techniques sismologiques rapprochées qui sont susceptibles de s'appliquer à un réseau télécommandé à l'intérieur de l'URSS. De plus, les sismographes canadiens sont relativement près du polygone d'essais du Nevada tout en étant sur la même masse continentale; le Nevada est la région choisie pour la plupart des essais des États-Unis (voir fig. 3).

Entre-temps, les États-Unis qui cherchent à prendre de l'expérience dans la capacité d'exploitation et la capacité opérationnelle de leur nouvelle station télécommandée, ont mis en place sur le continent nord-américain, un réseau de cinq unités, sous le nom de *Regional Seismic Test Network*. À la suite d'accords entre les deux pays, deux de ces unités se trouvent au Canada. Une d'entre elles est située à Red Lake (Ontario) tandis que la seconde se trouve près de Yellowknife, à proximité de l'ensemble canadien. Il sera donc possible de comparer le rendement respectif des deux stations de Yellowknife qui sont tout à fait différentes.

Figure 16 Prototypé étatsunien de station sismologique automatique de surface dans les Adirondacks, renfermant du matériel d'émission-réception ainsi qu'une antenne pour les communications par satellite avec le système RSTN (voir fig. 17) (Courtoisie des Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nouveau-Mexique.)



Figure 17 Le Regional Seismic Test Network. Les stations du bouclier canadien à Yellowknife (RSTN) et à Red Lake, Ontario (RSON) sont exploitées dans le cadre d'une coopération entre le ministère canadien de l'Énergie, des Mines et des Ressources d'une part et le département de l'Énergie des États-Unis. Les données sismiques sont transmises à Albuquerque (Nouveau-Mexique) par le satellite WESTAR.



Le chemin qui reste à faire

1971 - 1972

1971 - 1972

Le chemin qui reste à faire est long et difficile. Il faut continuer à travailler pour améliorer la situation de nos concitoyens. Les services sociaux doivent être renforcés et les programmes de logement développés. L'éducation doit être accessible à tous et la santé publique améliorée. Les collectivités locales ont un rôle crucial à jouer dans ce processus.

Il est essentiel de maintenir un dialogue ouvert avec les citoyens et de leur offrir des opportunités de participation active. Les politiques doivent être adaptées aux besoins réels de la population. La transparence et la responsabilité sont des valeurs fondamentales qui doivent guider toutes nos actions.

En conclusion, le chemin qui reste à faire est exigeant, mais il est réalisable si nous nous engageons tous à travailler ensemble. Nous devons rester fidèles à nos valeurs et à nos engagements envers nos concitoyens.

Le développement durable est notre objectif ultime. Cela implique de prendre en compte les dimensions économique, sociale et environnementale. Nous devons adopter des pratiques responsables et innovantes pour répondre aux défis de notre époque.

La coopération internationale est également essentielle pour relever les défis globaux. Nous devons travailler en partenariat avec d'autres nations pour promouvoir la paix, la justice et le bien-être de tous.

Enfin, nous devons rester vigilants face aux nouvelles menaces et opportunités. L'adaptation et l'apprentissage continu sont des clés du succès à long terme.

Chapitre sept

Le chemin qui reste à faire

Ce type de données rapprochées constitue peut-être un élément-clé pour accroître notre capacité d'identifier des événements plus petits. À l'heure actuelle, les sismologues n'en savent pas beaucoup au sujet du mode de propagation des ondes énergétiques de fréquence plus élevée à travers la croûte terrestre. Par conséquent, une des questions sur lesquelles ils se pencheront est celle de la possibilité que les ondes P de fréquence beaucoup plus élevée que les ondes dont on s'est servi auparavant pourraient être utilisées pour identifier des événements nucléaires à faible énergie, même si ces ondes ont tendance à faiblir rapidement avec la distance.

M. North fait remarquer qu'aucune détonation nucléaire ou détonation délibérée d'explosifs classiques ne sera nécessaire au cours de cette recherche canadienne. Il existe un grand nombre de petits tremblements de terre, de coups de mines et de coups de charge provenant de sources diverses qui peuvent être utilisés.

Il reste vrai que la tâche de vérification, déjà assez complexe, sera encore accrue si un plus grand nombre de données rapprochées doivent aussi être analysées.

Le facteur décisif

La plupart des scientifiques qui ont étudié ces questions conviennent que, d'un point de vue technique, n'importe quel traité visant à interdire les essais nucléaires doit s'appuyer sur un désir sincère de la part de toutes les parties, de le rendre opérant. Il serait extrêmement facile pour n'importe quel pays dans à peu près n'importe quelle partie du monde de procéder à l'essai d'engins nucléaires sous-kilotonniques sans craindre d'être détecté, même si des capteurs internationaux étaient déployés à l'intérieur de son propre territoire. Quant à savoir si un facteur semblable constitue un obstacle à des négociations réussies concernant une interdiction des essais nucléaires souterrains, cela reste une question que les politiciens et les diplomates, plutôt que les scientifiques, devraient être en meilleure position de trancher.

Figure 18 Principales étapes des négociations et des initiatives internationales visant à interdire et à réglementer l'utilisation des armes nucléaires.

1946	*Plan étatsunien Baruch pour garantir que les armes atomiques ne sont employées qu'à des fins pacifiques.
1955	*Plan soviétique pour le désarmement général et complet ainsi qu'une interdiction de tous les essais d'armes nucléaires.
1958 (été)	*La première rencontre des experts en sismologie à Genève donne lieu à des recommandations pour l'implantation d'un réseau sismologique mondial et d'un système d'inspection sur place.
1958 (automne)	*Des négociations trilatérales (États-Unis, Royaume-Uni, URSS) au sujet d'un traité d'interdiction des essais conduisent à un accord sur un moratoire des essais nucléaires.
1959	*La France, les États-Unis, le Royaume-Uni et l'URSS signent un traité (maintenant signé par 32 pays) interdisant les essais nucléaires dans l'Antarctique.
1961	*Le moratoire sur les essais nucléaires se termine lorsque l'URSS fait détoner la plus grosse explosion nucléaire jamais enregistrée (58 mégatonnes).

-
- 1963 *L'Inde, le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS signent le Traité sur l'interdiction partielle des essais (maintenant signé par 111 pays) interdisant les essais nucléaires dans les océans, l'atmosphère et l'espace extra-atmosphérique.
-
- 1967 *La France, l'Inde, le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS signent le Traité sur l'espace extra-atmosphérique (aujourd'hui signé par 92 pays) interdisant le stationnement dans l'espace d'armes nucléaires ou d'autres armes de destruction massive.
-
- 1967 *Vingt-neuf pays latino-américains signent le Traité de Tlatelolco interdisant les armes nucléaires en Amérique latine.
-
- 1968 *Le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS signent le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (aujourd'hui signé par plus de 127 pays) en vue d'empêcher l'augmentation du nombre d'armes nucléaires et pour décourager leur distribution aux autres pays.
-

1971 *Le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS signent le Traité concernant le fond des mers (aujourd'hui signé par 81 pays) lequel interdit de placer des armes nucléaires sur le fond des mers.

1974 *Les États-Unis et l'URSS signent le Traité sur l'interdiction des essais dépassant un certain seuil (non ratifié) qui interdit les essais nucléaires souterrains d'une puissance supérieure à 150 kilotonnes.

1976 *Les États-Unis et l'URSS signent un Traité sur les explosions nucléaires à des fins pacifiques (non ratifié) afin d'établir des règles appropriées pour régir les explosions souterraines à des fins pacifiques.



60984 81800

LIBRARY E A/BIBLIOTHEQUE A E



3 5036 20023870 0

DOCS

CA1 EA365 86V01 FRE

Verification sismique. --

43242697

Canada

