Nations Unies A/53/202

Assemblée générale

Distr. générale
28 juillet 1998
Français
Original: anglais

Cinquante-troisième session
Point 67 de l'ordre du jour provisoire*

Le rôle de la science et de la technique dans le contexte de la sécurité internationale et du désarmement

Rapport du Secrétaire général

Table des matières

		Paragraphes	*Page*
Introduction		1–3	2
Tendances de la technologie dans certains domaines		4–151	2
A.	Technologie nucléaire	4–28	2
B.	Technologie spatiale	29–56	6
C.	Technologie des matériaux	57–84	12
D.	Technologie de l'information	85–112	17
E.	Biotechnologie	113–151	21

* A/53/150.

98-22226 (F) 100998 170998

Introduction

1. Le présent rapport est présenté en application des résolutions de l'Assemblée générale 51/39 du 10 décembre 1996 et 52/33 du 9 décembre 1997. Dans sa résolution 51/39, l'Assemblée priait le Secrétaire général de mettre à jour et de développer un rapport antérieur du 17 octobre 1990, intitulé «Les progrès scientifiques et techniques et leurs incidences sur la sécurité internationale» (A/45/568), afin d'évaluer les incidences des progrès scientifiques et techniques récents, surtout ceux qui peuvent avoir des applications militaires. Dans la résolution 52/33, l'Assemblée rappelait sa résolution 51/39 ainsi que sa demande au Secrétaire général de lui présenter un rapport mis à jour à sa cinquante-troisième session.

2. Le rapport de 1990 présentait les résultats d'évaluations portant sur les tendances et les progrès constatés dans cinq grands domaines : technologie nucléaire, technologie spatiale, technologie des matériaux, technologies de l'information et biotechnologie. Ces évaluations avaient été faites par des experts scientifiques qui avaient présenté leurs documents, pour examen, à une conférence de haut niveau sur le thème «Tendances nouvelles des sciences et des techniques : incidences sur la paix et la sécurité internationales», tenue à Sendai (Japon) en avril 1990. Le Gouvernement japonais en était l'hôte. Les documents présentés avaient été établis compte tenu des débats de la conférence.

3. Conformément à la demande formulée dans les résolutions 51/39 et 52/33, les experts qui avaient fourni les contributions initiales au rapport de 1990 ont été priés de mettre à jour leurs évaluations antérieures et, à cet effet, d'exposer brièvement les grandes lignes de l'évolution générale depuis le rapport précédent, de spécifier toute nouvelle tendance, en donnant des exemples si possible, et de formuler des observations sur les applications, à des fins pacifiques ou autres, des derniers progrès enregistrés. Les évaluations mises à jour, qui sont présentées ci-après, représentent les opinions de leurs auteurs.

Tendances de la technologie dans certains domaines

A. Technologie nucléaire*

4. Dans le rapport de 1990, il avait été dit qu'après quelques décennies de croissance rapide, la technologie nucléaire semblait être arrivée à maturité et qu'il était peu probable qu'elle enregistre au cours des années à venir des améliorations spectaculaires. Le terme «améliorations» ne doit pas s'entendre des progrès normaux de la recherche scientifique, mais plutôt de progrès susceptibles d'avoir une incidence – positive ou négative – sur la politique internationale de sécurité et sur les efforts de désarmement. Les faits ont corroboré cette prédiction, comme on le montrera ci-après.

5. Au cours des années 70 et 80, on a parfois entendu dire que la technologie avait pris le pas sur la politique. Les changements profonds qui ont marqué les relations internationales au cours des années 90 ont dans une certaine mesure redonné la primauté à la politique. Cela est peut-être plus évident dans le domaine nucléaire que dans de nombreux autres domaines, étant donné que les activités de recherche-développement nucléaire actuellement en cours ont essentiellement pour objet l'application de décisions politiques prises à la suite de ces changements.

6. Depuis la rédaction du précédent rapport, le monde a assisté, entre autres événements, à la dissolution de l'Union soviétique et au transfert de toutes les armes nucléaires soviétiques sur le territoire de la Fédération de Russie, au retrait de l'Europe de la quasi-totalité des armes nucléaires substratégiques et probablement à la destruction de la plupart d'entre elles, à la poursuite de l'application du Traité sur la réduction des armements stratégiques (START), à la signature de START II (encore que non ratifié) et aux pourparlers préliminaires concernant un futur START III. Sur un plan multilatéral, le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires a été prorogé pour une durée indéfinie, le Traité d'interdiction complète des essais d'armes nucléaires a été conclu – quoique assorti de dispositions qui pourraient en empêcher l'entrée en vigueur sous sa forme présente – et les efforts se sont multipliés afin de mettre au point un traité interdisant la production de matériaux destinés à la fabrication d'armes nucléaires. La guerre du Golfe et ses conséquen-

* La présente section a été rédigée par M. Tor Larsson, Coordonnateur des recherches sur les armes nucléaires au Centre de recherche sur la défense nationale de Stockholm (Suède).

ces ont permis de tirer des leçons importantes. Tout récemment, l'Inde et le Pakistan ont prouvé, en procédant ouvertement à plusieurs essais de dispositifs explosifs, qu'ils étaient capables de produire des armes nucléaires.

7. En théorie, tous les nouveaux faits mentionnés ci-dessus devraient être pris en compte dans la révision du rapport de 1990, qui traitait de l'évolution des domaines suivants :

- L'augmentation du nombre d'armes nucléaires;
- Le développement de la production d'énergie nucléaire à des fins civiles;
- Les méthodes de production de matières nucléaires;
- Les armes dites radiologiques;
- L'utilisation des lasers ou des faisceaux de particules dans les systèmes de défense antimissile active ou à d'autres fins dans un contexte d'armements nucléaires;
- Les techniques nucléaires de détection et de vérification de l'application des traités.

8. Dans la réalité, les changements mentionnés ci-dessus font que les priorités ne sont plus celles de 1990. Il a été en outre nécessaire de traiter de sujets qui, au mieux, n'avaient été qu'effleurés dans le précédent rapport, afin de rendre compte des orientations de tendances nouvelles devenues importantes en raison des événements récents. Comme dans le rapport précédent, on n'a pas pris en compte les progrès dans le domaine des vecteurs (missiles, etc.) et des rampes d'armement vu qu'ils ne sont pas scientifiquement liés à la technologie nucléaire.

Armes nucléaires

9. Dans le rapport de 1990, la question des limites, tant en ce qui concerne la puissance des armes que les possibilités de produire des armes à effets «sur mesure», occupait une place particulière. Or, il semble que cette question ait perdu de son intérêt aujourd'hui, tout simplement parce que l'on a, semble-t-il, arrêté aujourd'hui la mise au point de nouveaux systèmes d'armements nucléaires, et aussi parce que le risque d'une guerre nucléaire, où ces caractéristiques particulières auraient pu être jugées utiles, semble désormais très éloigné.

10. Un facteur important qui a fortement contribué à freiner, voire à arrêter la mise au point de nouveaux types d'explosifs nucléaires – si tant est qu'on s'y soit employé antérieurement – a été la longue suspension des essais nucléaires par les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie et le Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord. Ces trois pays ont fait leurs derniers essais nucléaires, qui resteront probablement sans suite, en 1992, 1990 et 1991 respectivement, tandis que la Chine et la France ont poursuivi les leurs jusqu'en 1996. Toutefois, au cours de cette même année, les cinq pays traditionnellement reconnus comme puissances nucléaires se sont engagés à mettre fin aux essais nucléaires en signant le Traité d'interdiction complète des essais d'armes nucléaires. Certes, les essais effectués en mai 1998 par l'Inde et par le Pakistan ont un impact politique considérable, mais rien ne permet d'affirmer que ces essais font suite à des progrès technologiques dépassant le niveau technique atteint depuis longtemps par les cinq puissances nucléaires.

11. D'un autre côté, certains États dotés d'armements nucléaires se sont préoccupés de savoir comment maintenir la qualité technique de leurs arsenaux nucléaires (ou des stocks restant après l'application des mesures de réduction des armements), puisqu'il n'était plus possible de procéder à des essais intégraux. C'est pourquoi, le Gouvernement des États-Unis a consacré des sommes importantes à ce qu'on appelle généralement un «programme de maintien», et la France mène de son côté un programme similaire encore que beaucoup plus modeste. Toutefois, on ne voit guère quel pourrait être le contenu futur de ces programmes et dans quelle mesure ils pourraient contribuer à apporter des modifications et des améliorations techniques aux ogives nucléaires dont ils sont censés assurer «le maintien».

12. Tel qu'il est présenté par ses tenants, le «programme de maintien» devrait permettre : a) de sauvegarder et bien appréhender toutes les connaissances acquises lors d'essais précédents; b) de simuler au maximum les effets des armes; et c) d'adopter des méthodes de calcul appropriées pour le remplacement, la rénovation ou la modernisation des composantes d'armes arrivant à la fin de leur durée de vie. Le second de ces points a essentiellement trait aux effets des rayonnements sur les éléments microélectroniques modernes, dont l'importance est critique tant pour les systèmes offensifs que défensifs. La place faite à ce problème pourrait être un signe de l'importance que l'on continue à accorder aux impératifs imposés par un affrontement stratégique nucléaire. Le troisième point rappelle un aspect déjà bien connu lorsque le précédent rapport a été rédigé, mais grandement omis dans les débats de l'époque : il s'agit du vieillissement de diverses pièces d'une ogive nucléaire.

13. On sait que lorsque le tritium est indispensable pour le fonctionnement d'une ogive, il faut le remplacer à intervalles réguliers, sa période radioactive étant d'environ 12 ans. Toutefois, de nombreuses autres pièces, non nucléaires, peuvent elles aussi vieillir. Il peut par exemple y avoir de composition sous l'effet des rayonnements dans les explosifs brisants, dégradation produite par la chaleur dans certaines parties ou corrosion aux interfaces entre différents matériaux. D'une façon générale, on estime que les ogives nucléaires

doivent faire l'objet d'une révision complète tous les 5 à 10 ans. En raison de la situation économique délicate de la Fédération de Russie et de ses difficultés à assurer un entretien aussi satisfaisant que précédemment, certains commentateurs russes font valoir que, pour une large part, l'arsenal nucléaire russe ne présente plus aujourd'hui aucune fiabilité technique. Toutefois, de nombreux observateurs doutent que les programmes de recherche vastes, ambitieux et onéreux destinés à traiter ces problèmes soient vraiment nécessaires et pensent donc qu'ils peuvent en outre avoir pour ambition d'éluder l'interdiction des essais nucléaires et de mettre au point de nouvelles armes.

Production d'énergie nucléaire

14. Il est indéniable que le développement de l'énergie nucléaire à des fins civiles porte en lui quelques risques de prolifération d'armes, mais le rapport précédent avait signalé que dans la réalité rien ne montrait que ce risque soit particulièrement important. Il n'y a aucune raison pour revenir aujourd'hui sur cette opinion, vu que la prolifération d'armes qui a incontestablement eu lieu a correspondu à des considérations politiques et se serait probablement produite même si les États en cause étaient moins tributaires de l'énergie nucléaire. Nonobstant, l'énergie nucléaire peut influer indirectement sur la sécurité internationale par d'autres voies, notamment de par son importance sur le plan de l'offre énergétique mondiale mais aussi en raison des préoccupations du grand public sur le front de l'environnement et de la sécurité. Ces préoccupations ont, selon toute vraisemblance, freiné le développement de l'énergie nucléaire dans de nombreux pays.

15. Une des conséquences de la lente progression de la production d'énergie nucléaire est qu'il n'y a aucune pénurie de combustible nucléaire, ou d'uranium, matière première de ce combustible. Vu les techniques actuellement disponibles et le taux de progression présent, on prévoit que les réserves connues d'uranium répondront aux besoins mondiaux pendant de nombreuses années, encore que l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) estime qu'il faudra envisager avant 2050, une utilisation plus efficiente des ressources d'uranium. En ce qui concerne le combustible de réacteur, l'offre dépasse actuellement la demande si l'on prend en considération le plutonium.

16. Dans le rapport de 1990, il était indiqué que l'on s'intéressait de plus en plus à la technologie des combustibles à base de mélange d'oxides (MOX) et cela, parce qu'il fallait faire quelque chose devant l'augmentation des stocks de plutonium. Ce plutonium provient pour une part d'armes nucléaires mises au rebut, mais pour l'essentiel de combustible irradié de réacteurs de puissance. Les stocks continuant à croître, on mène aujourd'hui plusieurs programmes de recherche visant à résoudre le problème du plutonium et à promouvoir en même temps, mais non nécessairement, la production d'énergie. Une des idées avancées à cet égard est celle d'un réacteur sous-critique actionné par un accélérateur. Ce serait là une solution qui évite pratiquement tout accident de réacteur, car il suffit de couper l'accélérateur pour arrêter le réacteur. Le problème de l'évacuation du plutonium est examiné plus avant.

17. La recherche de méthodes permettant de créer de l'énergie nucléaire à partir de procédés autres que la fission avance par paliers. Malgré de vastes programmes internationaux de recherche, tels le Tor européen commun (JET) et le Réacteur expérimental thermonucléaire international, l'avenir de l'utilisation pratique de l'énergie de fusion reste incertain. Il semble qu'il en soit de même pour d'autres solutions scientifiquement intéressantes actuellement étudiées, notamment «la fusion à confinement inertiel»

18. D'autres solutions, plutôt insolites, dont l'utilisation de l'état isomérique du noyau dû au spin et l'accélération électrostatique des ions de deutérium afin de produire un flux important de neutrons, sont encore plus hypothétiques. On ne les mentionne ici que pour mémoire et on ne les présente pas comme étant des sources éventuelles d'énergie car aucune d'elles ne peut produire plus d'énergie qu'elle n'en consomme.

Production et évacuation de matières nucléaires

19. Aux alentours de 1990, on s'est fortement intéressé à de nouvelles méthodes de production de matière fissile, notamment par utilisation du rayonnement laser. Il s'agissait surtout de faire face à des préoccupations de prolifération, mais on y voyait aussi la possibilité de produire à moindres frais de l'uranium faiblement enrichi pour servir de combustible de réacteur. Le premier de ces aspects semble avoir perdu beaucoup de son importance. Il y a eu prolifération et les matériaux utilisés ont été produits par les méthodes classiques. En fait, la tentative de prolifération avortée en Iraq a eu en partie pour origine l'utilisation de la séparation isotopique électromagnétique, méthode abandonnée depuis longtemps par les cinq puissances nucléaires en raison de sa faible efficience et de son coût élevé.

20. En ce qui concerne le combustible de réacteur, précédemment mentionné, le principal problème est aujourd'hui l'abondance plutôt que le manque de matière fissile. De surcroît, la capacité mondiale d'enrichissement n'est utilisée actuellement qu'à 80 % environ de sa totalité. On considère cependant que la mise au point de méthodes plus économiques de production d'uranium enrichi continue à présenter

un intérêt commercial. Voilà pourquoi on poursuit des recherches sur des techniques connues sous le nom de SILVA (séparation isotopique par laser à vapeur atomique) et SILMO (séparation isotopique par irradiation au laser de molécules) aux États-Unis et ailleurs. En outre, une nouvelle méthode appelée SILEX (séparation d'isotopes par excitation au laser) est actuellement mise au point. On pense que toutes ces techniques peuvent devenir, avec le temps, plus intéressantes que la centrifugation et que la diffusion gazeuse, technique d'enrichissement un temps prédominante, est devenue obsolète et n'est plus économiquement viable pour l'avenir. Ces considérations n'ont pas de conséquence immédiate sur le plan du désarmement, mais il faudra en tenir compte lorsqu'on envisagera des moyens de vérification de l'application d'un éventuel traité de cessation d'activités dans ce domaine.

21. On n'a pas examiné dans le précédent rapport la technologie de la transmutation, car on la considérait comme une méthode de production de matière fissile assez hypothétique et sans objet. Toutefois, au cours des années 90, la recherche sur la transmutation a pris de l'importance en ce sens qu'elle pouvait ouvrir des possibilités d'évacuation des déchets nucléaires provenant des réacteurs et des matériaux d'armements excédentaires. On mène actuellement dans plusieurs pays, dont les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et le Japon, des programmes de recherche sur cette question. L'idée de base consiste à utiliser un accélérateur de particules pour produire des flux très importants de neutrons rapides (de haute énergie), par un procédé appelé spallation. Lorsque ces neutrons interagissent avec les matières à évacuer, ils les transforment en d'autres nucléides qui sont moins sujets à prolifération et qui diminuent (sans toutefois la supprimer entièrement) la nécessité d'un stockage définitif dans des dépôts géologiques. Certaines des solutions proposées sont expressément conçues comme des méthodes d'évacuation des déchets, tandis que d'autres pourraient contribuer à accroître l'offre d'énergie s'il en résulte un intérêt économique. Bien qu'il reste de nombreux problèmes techniques à résoudre, on peut considérer la transmutation comme étant à l'heure actuelle le sous- domaine le plus prometteur et le plus important de la technique nucléaire.

22. Il est un facteur qui complique le problème du plutonium : c'est l'absence de toute politique concertée en la matière. On trouve fondamentalement deux écoles de pensée différentes : selon la première, à laquelle appartiennent de nombreux hommes de science russes, le plutonium actuellement disponible présente un très grand avantage économique et devrait être utilisé au mieux pour produire de l'énergie. La seconde école, à laquelle adhèrent de nombreux scientifiques américains, tient que les excédents de plutonium ont une valeur négative parce que l'on n'en a pas besoin pour produire de l'énergie et que leur utilisation dans du combustible MOX ou à d'autres fins serait très coûteuse.

Armes radiologiques

23. Cette question a été incluse dans le précédent rapport essentiellement pour mémoire, mais on ne s'y est pas attardé car ces armes ne présentent aucun intérêt pour de nombreuses raisons, notamment militaires. Rien n'est intervenu qui permette de revenir sur ce point de vue et on ne sache pas que l'on mette au point où que ce soit des armes de cette catégorie. Il n'y a toutefois encore aucun accord international visant à les interdire.

Techniques de défense antimissiles balistiques

24. La décision prise par le Gouvernement américain en 1983 de poursuivre l'«Initiative de défense stratégique» a soulevé des débats sur les diverses possibilités techniques de mettre hors de combat les missiles balistiques en plein vol, notamment les rayons laser et les faisceaux de particules de types différents. Les défenses antimissiles balistiques relevant à l'évidence de la stratégie nucléaire, le rapport de 1990 a présenté quelques observations sur les armes à laser, encore que l'intérêt qu'elles suscitaient commençait déjà à se dissiper et que les techniques correspondantes ne relèvent pas du domaine nucléaire à proprement parler.

25. La guerre du Golfe a démontré à la fois l'utilité de ce que l'on a appelé les systèmes de défense antimissiles de théâtre et, paradoxalement, les failles de ces systèmes lorsqu'ils sont en place. En conséquence, au cours des années qui ont suivi cette guerre, on a vu se multiplier les activités de R-D dans ce domaine, et à l'heure actuelle, une dizaine de programmes différents sont en cours aux États-Unis. Si les lasers ne sont pas complètement laissés de côté, il est question dans la majorité des systèmes envisagés «d'armes à énergie cinétique» c'est-à-dire d'armes qui détruisent par collision tout missile approchant. Cette technologie, bien que loin d'être parvenue à maturité, apparaît aux yeux de nombre de ses tenants comme un élément de base important de la sécurité nationale à l'avenir. Si on continue à considérer que ces systèmes relèvent de l'armement nucléaire, c'est surtout parce que certains observateurs soviétiques craignent que l'un ou plusieurs d'entre eux ne soient ultérieurement améliorés et amenés à jouer un rôle stratégique. Il en résulte un obstacle supplémentaire sur la voie du désarmement nucléaire bilatéral.

Techniques de détection et de vérification

26. Dans le rapport de 1990, on avait évoqué la question

de l'instrumentation nécessaire pour déterminer si un objet particulier est ou non un engin nucléaire et signalé que cette instrumentation était en principe disponible, mais que son application pratique risquait d'être difficile dans de nombreux cas. Ultérieurement, ce problème a pris une dimension nouvelle en raison de la préoccupation actuelle de nombreux États devant les risques de vol et de contrebande de matières nucléaires, avec les implications qui en résultent sur le plan de la prolifération et du terrorisme nucléaire. C'est pourquoi les autorités douanières et de police de nombreux pays ont ressenti la nécessité de renforcer leurs capacités de détecter des objets radioactifs; de ce fait, on a conçu et commercialisé des instruments particulièrement adaptés à cet effet. Certes, ces instruments ne correspondent pas à une technologie nouvelle, mais ils témoignent d'un nouvel aspect de l'ère nucléaire.

27. Le précédent rapport a fait également état de la vérification de l'application des traités. Il y a été souligné que si l'on comprenait mieux les rayonnements des armes nucléaires et les phénomènes nucléaires, il serait plus facile de mettre au point des procédés de vérification, et rappelé en outre que la plupart des méthodes de vérification disponibles n'avaient rien de nucléaire. Il en est sûrement de même aujourd'hui. Toutefois, dans le climat politique prévalant tout au long des années 90, et tout particulièrement après la conclusion du Traité d'interdiction complète des essais d'armes nucléaires, la question de la vérification est entrée elle aussi dans une nouvelle phase. Ici encore, aucune nouvelle technique essentiellement nucléaire n'intervient, le fait important étant la place particulière faite désormais dans le monde entier aux opérations de contrôle en coopération par des moyens techniques divers. Parmi ces moyens, on peut citer un réseau de stations automatisées de mesure des substances radioactives en suspension dans l'air, qui est désormais capable de détecter des isotopes radioactifs dans les gaz rares. Le programme "93 + 2" lancé par l'AIEA est une autre forme de contrôle en coopération. Il vise à réduire les risques et craintes de prolifération grâce à une transparence accrue des efforts nationaux sur le plan des techniques nucléaires et il est en outre intéressant en ce sens qu'il met au point de nouvelles méthodes, à défaut de nouveaux instruments techniques.

28. Il y a enfin lieu de mentionner une question qui n'a pas été du tout abordée dans le rapport de 1990 : la contamination radioactive de l'environnement résultant de la production et d'essais antérieurs d'armes nucléaires, et de la non-maintenance de composantes des systèmes nucléaires, comme les réacteurs de sous-marins. Dans le monde d'avant 1990, ces problèmes étaient presque toujours jugés peu importants au regard des problèmes de sécurité nationale et, dans certains cas, ils étaient parfaitement ignorés. Toutefois, après la détente.politique entre les grandes puissances, les problèmes d'environnement sont passés au premier plan et font désormais l'objet de recherches internationales. Parallèlement, les méthodes de mesure et d'analyse de la radioécologie ont évolué à la suite de l'accident de Tchernobyl. Bien que les risques que présentent ces contaminations pour la personne humaine soient parfois exagérés dans les débats publics, il est parfaitement logique que l'on y prête attention dans un monde qui s'efforce constamment d'améliorer le climat international, aux sens littéral et figuré du terme.

B. Technologie spatiale*

29. Du point de vue de la sécurité, on distingue les principaux domaines d'activité dans l'espace ci-après :

- L'utilisation d'objets basés dans l'espace pour accroître la capacité non seulement des armes nucléaires terrestres, mais également des armes classiques;
- La mise au point et, dans une certaine mesure, le déploiement d'armes antisatellite, en réponse à une nécessité que l'on perçoit;
- L'utilisation du potentiel spatial pour défendre le pays contre les missiles à courte et à moyenne portée de l'adversaire;
- Le potentiel accru des satellites civils de télédétection et la commercialisation des images ainsi créées.

Les sections ci-après donnent un aperçu succinct des tendances et de certains faits nouveaux observés dans ces domaines.

Les satellites et les missions d'appui militaire

30. Depuis 1990, il y a eu certains changements dans la façon dont l'espace est utilisé, et les moyens spatiaux ont été accrus. Aux États-Unis, les utilisations militaires de l'espace continuent de se développer, les systèmes spatiaux étant censés «jouer un rôle irremplaçable»[1]. Dans la Fédération de Russie, les activités spatiales militaires se poursuivent dans des domaines traditionnels comme la météorologie, la navigation, les communications et la reconnaissance.

31. **Satellites météorologiques**. Aux États-Unis, des satellites météorologiques militaires et des satellites météorologiques civils ont été mis sur orbite basse; ces deux catégories de satellites sortent des mêmes usines. Les engins

* La présente section a été rédigée par M. Bhupendra Jasani, professeur au Department of War Studies, King's College London, Université de Londres.

spatiaux militaires sont lancés dans le cadre du «Defense Meteorological Satellite Program». La tendance actuelle consiste à intégrer les satellites militaires dans les forces armées en vue de leur utilisation dans des situations de combat. Cela vaut également pour les satellites météorologiques dont l'utilisation est prévue à l'occasion, par exemple, de débarquements de l'armée de terre ou de largages d'approvisionnements[2]. Dans la Fédération de Russie, un réseau unique de satellites météorologiques est déployé. Rien ne permet de penser que les moyens spatiaux y seraient utilisés autrement qu'aux États-Unis.

32. L'accent est mis aussi aujourd'hui sur les prévisions du «temps dans l'espace». Sont ainsi visées principalement les activités solaires comme les éruptions suivies de l'éjection de toutes sortes de matières à partir de la surface du Soleil. Il en résulte un rayonnement électromagnétique 6qui va des ondes hertziennes aux rayons X en passant par les protons à haute énergie et les changements qui affectent les vents solaires interplanétaires. Les interactions de ces facteurs avec les satellites placés sur orbite terrestre affectent les détecteurs et leurs systèmes électroniques.

33. **Satellites de navigation**. La Fédération de Russie exploite des satellites de navigation militaires et civils discrets placés sur orbite basse et utilisant le même type de plate-forme. Par contraste, les utilisateurs civils et militaires utilisent les satellites américains Transit et GPS (Global Positioning System ou Système de positionnement universel). Dans ce système, qui se compose d'un ensemble de 24 satellites, l'engin spatial émet deux signaux distincts : le premier, utilisé à des fins militaires, atteint une précision de l'ordre d'environ 10 mètres; le second, utilisé à des fins civiles, n'atteint qu'une précision de l'ordre d'une centaine de mètres. Ce que l'on appelle la «disponibilité sélective» pourrait disparaître d'ici à 2006[3]. Et la précision dans la détermination du positionnement passerait, dans le second cas, de 100 à 10 mètres. En utilisant un différentiel de correction, la précision pourrait être de l'ordre de 5 mètres ou encore moins[4]. On a également annoncé récemment que les États-Unis envisageaient d'ajouter des signaux de navigation utilisés à des fins civiles sur une seconde fréquence GPS. Il est proposé de transmettre des signaux à différentiel de correction sur cette nouvelle fréquence utilisée à des fins civiles[5].

34. **Satellites de communication**. Les États-Unis et la Fédération de Russie lancent des satellites de communication distincts utilisés à des fins militaires et à des fins civiles. Le réseau américain de satellites de communication comprend l'Air Force Satellite Communication (AFSATCOM), le Defense Satellite Communication System (DSCS), le Fleet Satellite Communication (FLTSATCOM) et les satellites du Military Strategic and Tactical Relay (MILSTAR). Tous les services de l'armée, ainsi qu'un certain nombre d'organismes gouvernementaux, utilisent le système DSCS (système de télécommunications par satellite pour la défense). Les données stratégiques des télécommunications et du renseignement sont relayées par les satellites du Satellite Data System (SDS), appelés à être remplacés par les satellites MILSTAR, qui ont été conçus pour résister à des attaques lancées avec des armes nucléaires, voire avec des armes antisatellite. Trois satellites de la série MILSTAR 1 ont été construits; des modifications ont considérablement accru leur capacité et ils constituent à présent la série MILSTAR 2[6].

35. **Satellites de reconnaissance**. Il existe essentiellement quatre types de satellites de reconnaissance, à savoir les satellites de photoreconnaissance, les satellites de reconnaissance électronique, les satellites d'observation maritime et les satellites de détection lointaine. Les États-Unis et la Fédération de Russie continuent de lancer de tels engins spatiaux sur orbite, mais en nombre plus réduit. Ainsi en 1990, environ 132 satellites de défense avaient été lancés par la Chine, les États-Unis, la France, Israël, le Royaume-Uni et l'ex-URSS; en 1992, le chiffre était retombé à 74 et il a encore été réduit en 1998, en raison notamment du fait que la Fédération de Russie lance moins de satellites que dans le passé. La Chine, la France et Israël ont lancé des satellites d'observation optique. Depuis plusieurs années, les États-Unis ne procèdent plus à de nombreux lancements, probablement parce qu'ils ont mis au point des satellites plus perfectionnés dont la capacité et la durabilité ont été accrues.

36. Dans le passé, la photoreconnaissance était chose courante. Récemment, l'Administration américaine a rayé de la liste des documents secrets les images de renseignement acquises entre 1960 et 1972 par des satellites américains de photoreconnaissance des premières générations. Aujourd'hui, les images acquises par ces satellites sont disponibles sur le marché. Les meilleures images, qui ont une résolution d'environ 15 centimètres, proviennent de la version la plus perfectionnée des satellites KH, les KH-11, la version améliorée du KH-11 et les KH-12, qui sont dotés de capteurs sensibles à la lumière visible et quasi infrarouge, et qui émettent un rayonnement thermique infrarouge leur permettant de détecter la chaleur émise par des installations industrielles. Les capteurs d'infrarouge peuvent détecter le camouflage. Il est possible de détecter des structures enfouies en observant les différences dans les signatures thermiques. Le premier de ces nouveaux satellites a été lancé le 28 novembre 1992.

37. Pour remédier au fait que les satellites mentionnés plus haut ne peuvent voir à travers les nuages, on a mis au point et déployé des capteurs radar. Le renseignement obtenu par radar imageur, comme le radar à synthèse d'ouverture (SAR),

est très différent de celui obtenu par des capteurs optiques, car le radar à synthèse d'ouverture est particulièrement sensible aux caractéristiques géométriques de la surface et de l'objet observés, ainsi qu'à leurs propriétés diélectriques. Le rayonnement hyperfréquences possède une capacité de pénétration d'un objet qui est proportionnelle à la longueur d'ondes du rayonnement. En général, plus la longueur d'ondes est étendue, plus grande est la pénétration. Par exemple, un rayonnement avec une longueur d'ondes de la bande C peut pénétrer de courtes distances, alors qu'un faisceau radar SIR-C de la bande L a pu pénétrer plusieurs mètres de sable sec[7].

38. À ce jour, seuls les États-Unis et la Fédération de Russie ont mis des satellites militaires radar sur orbite. Le dernier engin spatial américain mis sur orbite est le satellite Lacrosse, doté d'un radar à synthèse d'ouverture (SAR), qui tourne autour de la Terre à une altitude tout juste inférieure à 700 kilomètres et possède une résolution SAR d'environ 1 mètre. Trois satellites de ce type ont été lancés : le premier en décembre 1988, qui n'est plus en orbite, le deuxième en mars 1991 et le troisième en 1997. Un satellite Lacrosse amélioré a été lancé le 23 octobre 1997 à une inclinaison orbitale de 68° et à une altitude d'environ 680 kilomètres[8]. La Fédération de Russie continue de lancer ses satellites radar appartenant aux séries d'engins spatiaux Almaz et Cosmos.

39. L'autre catégorie très importante de satellites est constituée par les engins spatiaux de reconnaissance électronique, mais on ne sait toujours pas grand-chose à leur sujet, car ils continuent d'être classés ultrasecrets. Aux États-Unis, quatre catégories de ces satellites ont été lancées, à savoir des satellites de renseignement sur les communications (COMINT) sur l'orbite des satellites géostationnaires, des satellites de renseignement sur les transmissions ou de renseignement électronique (ELINT) sur l'orbite des satellites géostationnaires et des satellites sur orbite elliptique haute (HEO) ou sur orbite basse (LEO). Les satellites ELINT sont conçus pour détecter des transmissions de signaux de communication comme ceux émis sur les radios et les téléphones, ainsi que le radar et la télémesure de missiles émise pendant les essais desdits missiles.

40. La plupart des satellites américains SIGINT/ELINT sont placés sur l'orbite des satellites géostationnaires et n'assurent pas une bonne couverture des confins septentrionaux et méridionaux de la Terre. Il est remédié à ces lacunes par les satellites de la série Trumpet qui sont placés sur des orbites elliptiques hautes dont l'apogée (la plus grande distance par rapport à la surface de la Terre) se situe à 37 000 kilomètres au-dessus de l'hémisphère Nord, avec une inclinaison orbitale de 63°. Deux de ces satellites ont été lancés en 1994 et en 1995, et un troisième satellite amélioré devait être lancé à la fin de 1997; il devait être doté d'une antenne en réseau complexe à commande de phase pour l'écoute électronique à large bande, mesurant quelque 90 mètres[9]. Ce satellite peut surveiller tous types de transmissions électroniques militaires en provenance de la Chine ou de la Fédération de Russie. Ce même type d'antenne sera utilisé sur les satellites de communication commerciaux perfectionnés.

41. Tant les États-Unis que la Fédération de Russie ont déployé des satellites d'alerte lointaine. Les États-Unis ont choisi de les déployer sur l'orbite des satellites géostationnaires. Les satellites utilisent des capteurs d'infrarouge pour détecter la chaleur dégagée par les panaches de missiles au moment même du lancement ou dès que de la chaleur est dégagée par une explosion nucléaire basée dans l'atmosphère ou dans l'espace. Ils poursuivent aussi le missile et ils déterminent sa trajectoire. L'efficacité de ce type d'engin spatial a été démontrée pendant la guerre du Golfe en 1991. Les satellites américains d'alerte lointaine ont détecté le lancement des missiles Scud iraquiens et ont pu alerter en temps utile les forces de la coalition. Ces satellites vont être dotés d'un système de communication à laser qui permettra de réduire leur vulnérabilité en cas d'attaques contre leurs stations au sol[10]. Une nouvelle génération de système d'alerte lointaine (Follow-on Early Warning System, FEWS) devrait permettre le déploiement de systèmes comme les intercepteurs à énergie cinétique Brilliant Pebbles et Brilliant Eyes conçus dans le cadre de l'Initiative de défense stratégique et dotés de moyens de traitement des données qui leur permettront d'envoyer directement au champ de bataille, à des fins tactiques, des messages d'alerte lointaine.

Quelques tendances nouvelles

42. Outre les progrès techniques comme ceux mentionnés ci-dessus, les États-Unis s'emploient activement à mettre au point plusieurs nouveaux systèmes de renseignement. Des satellites novateurs comme les satellites radar Lacrosse et la version perfectionnée du satellite de renseignement de type KH-11, sont entrés à présent dans une phase opérationnelle. De plus, on est en train de mettre au point un nouveau satellite chargé de détecter les lancements de missiles qui pourrait utiliser la technique des capteurs mise au point pour le système de repérage et de surveillance de la phase de propulsion dans le cadre de l'Initiative de défense stratégique.

43. Il faut signaler, au nombre des autres nouveautés, les satellites Cheapsat, qui sont petits et légers, les satellites de renseignements électromagnétiques sur l'orbite des satellites géostationnaires et un nouveau système de surveillance basé dans l'espace pour la surveillance terrestre, aérienne et maritime. On envisage, par exemple, la mise au point d'un système de satellites comprenant 24 engins spatiaux dotés

d'un radar à synthèse d'ouverture (STARLITES), qui pourrait être utilisé à des fins tactiques sur le terrain, avec un délai supplémentaire d'environ 15 minutes. La mise au point de ce genre de satellite de dimension réduite et d'un prix plus abordable devrait se poursuivre.

44. La qualité des satellites civils de télédétection a été améliorée considérablement. Au cours des 25 dernières années, leurs moyens ont été multipliés par 180, avec un pouvoir de résolution allant de 2 mètres à 30 mètres. On peut aujourd'hui acheter des images acquises par différents pays. Le tableau 1 donne un aperçu succinct de ces satellites commerciaux.

Tableau 1
Satellites commerciaux de télédétection, existant ou en voie de construction, dont disposent plusieurs pays

Pays/ Satellite	*Date de lancement du premier satellite*	*Résolution mesurée en pixel (m)*		
		Panchro-matique	*Multispectrale*	*Ther-mique*
Chine/Brésil				
CBERS	1998	20	20	160
France				
SPOT-1, -2, -3, -4	1986	10	20	
SPOT-5A, -5B	2002-3	2,5.5	10	
Inde				
IRS-1C, -2D	1995,1997	5,8	23	
IRS-P6	1998?	2,5		
Israël				
Eros-1, -2	1998	1,5	5 (3-4 bandes)	
David	1998	5		
Japon				
ALOS	2002	2,5	10	
Russie				
Kosmos	1991	2	20	
États-Unis				
Landsat-4, -5	1982		30	120
Landsat-7	1998?			60
IKONOS-1, -2	1998	0,8-1	4	
Quickbird-1, -2	1999	1	3,3	
Orbview-3, -4	1999	1	4	
Earlybird-1	2000	3	15	

45. Plusieurs pays exploitent des satellites dotés de capteurs SAR (radar à synthèse d'ouverture) (voir tableau 2). L'interaction de l'énergie des hyperfréquences avec les matériaux ne dépend pas uniquement de ces fréquences mais également de la polarisation du faisceau du radar. Il est ainsi possible, en utilisant des faisceaux de diverses fréquences polarisés différemment et en leur assignant des couleurs différentes, de créer une image multispectrale. Les essais du SIR-C/X-SAR (radar à synthèse d'ouverture) américain effectués en avril et octobre 1994 ont généré de telles données multiparamètres SAR à partir de l'espace. En combinant ces données avec des données optiques, la technique pourrait devenir un instrument des plus utiles pour surveiller la surface de la Terre. Aujourd'hui, les satellites civils de télédétection peuvent être utilisés pour recueillir des renseignements sur les objectifs militaires

d'un adversaire. Ils peuvent également être utilisés pour vérifier des accords de maîtrise des armements, ainsi que des mesures de confiance. De ce fait, ils sont devenus des objectifs potentiels des armes antisatellite.

Tableau 2
Caractéristiques de certains satellites commerciaux dotés d'un radar à synthèse d'ouverture (SAR) passés, actuels et futurs

Pays/ Satellite	*Date de lancement*	*Résolution (m)*	*Bande/ fréquence (GHZ)*	*Polarisation*
Canada				
Radarsat-1	1995	8-100	C/5,3	HH
Radarsat-2	2001	3	C/5,3	QUAD
Europe (ASE)				
ERS-1, -2	1991, 1995	26-28	C/5,3	VV
ENVISAT	1999	30	C/5,3	HH, VV
Japon				
JERS-1	1992	18	L/1,3	HH
ALOS	2002	10	L/1,3	HH, VV
Russie				
ALMAZ-1	1991	15	S/3,125	HH
ALMAZ-2	1998	5	S/3,125	HH
États-Unis				
SEASAT	1978	25	L/1,3	HH
SIR-C	1981	8-30	L/1,28, C/5,3	HH, VV, VH, HV

Armes antisatellite et satellites et défense dans ce domaine

46. L'importance des satellites est clairement apparue pendant la guerre du Golfe en 1991. Au début du conflit, les États-Unis disposaient sur orbite d'un satellite Lacrosse SAR (radar à synthèse d'ouverture) et de six satellites de reconnaissance optique, soit trois KH-11 (ancien modèle) et trois autres KH-11 (modèle perfectionné). Cela leur permettait d'effectuer 12 survols quotidiens de la région du conflit[11]. En outre, il y avait de 15 à 20 satellites de renseignement électromagnétique pour l'interception des transmissions à faible puissance et à grande puissance[12]. Il y avait sur orbite, pendant le conflit, 3 satellites DMSP (Programme de données satellite météorologiques)[13], environ 15 satellites GPS (Système de positionnement universel)[14], ainsi que 2 satellites FLTSATCOM[15] et au moins 2 satellites DSCS-III (système de télécommunications par satellite pour la défense)[16]. Les États-Unis se servaient aussi des images provenant des satellites civils américains Landsat et des satellites français de télédétection SPOT (Système probatoire d'observation de la Terre) pour mettre à jour les cartes de la région du conflit[17].

47. La guerre du Golfe a ainsi marqué la première utilisation active de presque tous les types de satellites pendant un conflit. Parmi les recommandations formulées dans un plan récemment publié concernant les programmes spatiaux militaires américains d'ici à 2020, il y en a une qui concerne la mise au point et le déploiement d'une arme basée dans l'espace, capable de détruire des objectifs sur la Terre. Une autre recommandation concerne les moyens de faire face à des attaques dirigées contre des systèmes spatiaux (c'est-à-dire les armes antisatellite) et de prévenir de telles attaques[18]. S'agissant de la première de ces recommandations, qui concerne un projet à long terme, l'armée de l'air américaine a lancé un concours pour la conception d'une arme à laser basée dans l'espace[19]. Cela permettrait de démontrer simplement la faisabilité du laser comme moyen de détruire des missiles balistiques pendant la phase de propulsion, alors qu'à court terme les armes antisatellite pourraient devenir une réalité.

48. **Armes antisatellite**. Deux types d'armes ASAT (armes antisatellite) sont actuellement mis au point et expérimentés. Il s'agit des armes antisatellite à énergie cinétique (KEASAT), capables de détruire un objectif par collision et du laser chimique perfectionné à infrarouge (MIRACL), capable d'endommager les capteurs ou de détruire tout simplement le satellite. D'autres armes antisatellite à énergie cinétique font l'objet de recherches, notamment un canon à rail électromagnétique, un véhicule de destruction cinétique et un autodirecteur miniature. Ces deux dernières armes peuvent être lancées à partir de l'espace, de l'air ou du sol.

49. De nombreux systèmes américains d'armes spatiales avaient leurs contreparties dans l'ex–URSS, et c'est encore le cas aujourd'hui, jusqu'à un certain point, dans la Fédération de Russie. La principale différence tient au fait que cette dernière a mis fortement l'accent sur le rôle que ces armes peuvent jouer comme armes antisatellite. Au début des années 70, la mise au point des armes spatiales se faisait en deux phases. La première phase portait le nom de code Fon-1 et consistait dans la mise au point de notions et de techniques de pointe; la deuxième phase, dont le nom de code était Fon-2, était celle de la réalisation[20]. Le programme Fon-1 a été lancé officiellement vers 1976, l'accent étant mis en grande partie sur les armes antisatellite plutôt que sur la défense antimissiles balistiques. La recherche a été axée sur les armes à laser stratégiques et tactiques montées sur les avions, les véhicules blindés et les navires. En dehors des armes antisatellite à énergie cinétique classiques utilisant des

intercepteurs à ascension directe basés au sol, on a construit un prototype de laser à électrons libre à Storozhevaya, un laser à gaz MW à Troisk près de Moscou et un grand complexe laser à Sary Shagan. La Fédération de Russie a reconnu qu'elle possédait des systèmes d'armes antisatellite[21].

50. **Défense antimissiles balistiques**. Cette défense, bien qu'elle soit principalement basée au sol, est cependant examinée ici, parce que certains des objets basés dans l'espace, comme les satellites de reconnaissance, de communication et de navigation, constituent une partie importante du système. Par exemple, un satellite d'observation peut localiser le déploiement de missiles; un satellite d'alerte lointaine peut signaler le lancement d'un missile; une grande partie de ces renseignements peuvent être obtenus et des communications ultérieures établies par le biais de satellites militaires de communication; enfin, tout missile antimissile pourrait être guidé par un engin spatial de navigation. De plus, certains des missiles qu'il faut contrer voyagent dans l'espace extra–atmosphérique.

51. Le programme américain actuel de défense antimissiles balistiques porte sur la Theater Missile Defence (TMD) (défense antimissiles de théâtre, la National Missile Defence (NMD) (défense nationale antimissiles) et les techniques de pointe en matière de défense antimissiles balistiques. Certains missiles peuvent atteindre l'espace extra- atmosphérique et on les considère donc également comme des armes antisatellite potentielles. Un autre volet, plus important, du programme américain TMD est constitué par la Theatre High Altitude Area Defence (THAAD) (défense de zone en haute altitude). Il s'agit d'assurer une défense contre les missiles ayant une portée de plusieurs centaines de kilomètres. Les missiles THAAD sont conçus pour entrer en collision avec les missiles balistiques et non pour les détruire en explosant à proximité de l'objectif. Le missile THAAD déploie donc un intercepteur à énergie cinétique. Un autodirecteur infrarouge placé sur le véhicule à énergie cinétique assure le guidage en fin de trajectoire jusqu'à l'objectif. L'interception a lieu soit dans les couches supérieures de l'atmosphère soit dans l'espace extra-atmosphérique. Le système THAAD devrait avoir une portée de 200 kilomètres horizontalement et de 150 kilomètres verticalement. Cela en ferait une arme antisatellite potentielle.

52. Enfin, dans le domaine des techniques perfectionnées de défense antimissiles balistiques, des recherches vont être menées sur des intercepteurs à énergie cinétique perfectionnés dotés de capteurs améliorés, les structures de projectile, ainsi que les systèmes de guidage et de contrôle. Les armes à énergie dirigée, en particulier les lasers chimiques, feront l'objet de recherches dans la mesure où elles permettent d'envisager des capacités d'interception basées dans l'espace, à couverture mondiale, opérant pendant la phase de propulsion. Ces systèmes font appel à des techniques perfectionnées dans le domaine des détecteurs, comme les détecteurs matriciels et le lidar imageur. Il faudra étudier et cataloguer les signatures des panaches de missile et autres caractéristiques permettant d'identifier et de poursuivre les missiles. L'arme à énergie dirigée est principalement un laser aéroporté (ABL). L'aéronef, le YAL-1A, volera à une altitude tout juste supérieure à 12 000 mètres. Sans optique adaptative, la portée de destruction du laser pourrait atteindre 240 kilomètres; avec une optique adaptative, elle pourrait aller jusqu'à environ 400 kilomètres. Pour le premier essai, qui est prévu en 2002, le laser aéroporté pourrait abattre son premier missile balistique de théâtre[22].

53. On ne dispose pas de beaucoup d'informations concernant les systèmes TMD (défense antimissiles de théâtre) russes. On sait cependant que la Fédération de Russie a décidé de ne pas équiper de têtes nucléaires les missiles SH–11 Galosh et SH–08 Gazelle de l'unique système de défense antimissiles balistiques déployé autour de Moscou[23]. Au début des années 70, dans le cadre du programme Terra–3, l'ex–URSS avait construit un laser expérimental au centre d'essais de la défense aérienne à Sary Shagan. L'URSS a appris beaucoup sur l'interaction entre le laser et les véhicules de rentrée, mais Terra–3 ne s'est pas avéré être une arme utilisable.

Quelques conclusions

54. Au cours des huit dernières années, il y a eu des progrès significatifs dans le domaine des capacités spatiales militaires et de leurs applications. Une des applications les plus importantes a été l'utilisation d'objets spatiaux pour la conduite des opérations d'une guerre classique pendant la crise du Golfe en 1991 où pas moins de 40 satellites américains ont été utilisés pour accroître la capacité de renseignement des forces terrestres. D'autres pays pourraient s'intéresser davantage à l'acquisition d'une telle capacité, eu égard au fait que les renseignements collectés par les satellites de reconnaissance sont partagés de manière très parcimonieuse. Ceci pourrait inciter les pays qui ne possèdent pas encore une telle capacité à acquérir celle–ci. Il ne faudrait donc pas s'étonner si des États toujours plus nombreux s'efforcent d'acquérir des satellites militaires.

55. De tels engins spatiaux vont continuer à se multiplier, s'il est établi qu'on peut construire et mettre sur orbite de petits satellites d'un prix abordable sans que cela diminue beaucoup leur performance. Ces satellites contribuent à la transparence, ce qui peut être extrêmement important pour la vérification des traités bilatéraux et multilatéraux de maîtrise des armements. Dans ce contexte, l'augmentation de

la capacité des satellites civils d'observation revêt une importance considérable. Les données fournies par de tels satellites peuvent être achetées par tous ceux qui ont les moyens d'acheter les images. Toutefois, la diffusion de cette capacité n'a pas laissé de susciter une certaine préoccupation et a amené certains États à miser sur les armes antisatellite, ce qui pourrait relancer la course aux armements dans l'espace. Pour éviter pareille situation, on pourrait encourager la création d'organismes régionaux de vérification de la maîtrise des armements. Par exemple, l'Union de l'Europe occidentale (UEO) a établi près de Madrid un centre de satellites UEO chargé de la vérification des traités et de la surveillance des crises et de l'environnement[24]. En confiant la vérification et les mesures de confiance à un organisme multinational ou international, on réduit le risque qu'il soit fait un mauvais usage des données recueillies par les satellites.

56. Un autre domaine où les choses vont de l'avant est celui des moyens de défense stratégiques. Malgré le Traité de 1972 entre les États-Unis et l'ex-URSS sur la limitation des systèmes antimissiles balistiques, la recherche, la mise au point et, dans une certaine mesure, l'expérimentation continue en ce qui concerne certains types d'armes. C'est le cas, par exemple, des armes à énergie cinétique ou à laser basées au sol ou dans l'espace. Les choses vont de l'avant dans ce domaine, parce que l'on considère que certains de ces systèmes d'armes sont des systèmes de défense antimissiles balistiques tactiques et non des systèmes de défense antimissiles balistiques stratégiques. De toute façon, les premiers de ces systèmes sont à présent autorisés, les États- Unis et la Fédération de Russie étant convenus que le Traité ABM n'interdit pas de tels systèmes. Il existe cependant de nombreux chevauchements dans les techniques qu'exigent les systèmes de défense antimissiles balistiques tactiques et les systèmes antisatellite, et nombre de ces armes ont été définies comme des armes spatiales[25]. Ainsi donc, même après la fin de la guerre froide, il n'est pas du tout exclu que la course aux armements dans l'espace s'intensifie.

C. Technologie des matériaux*

57. La science des matériaux est l'étude des principes qui régissent les propriétés utiles des substances. La technologie des matériaux est une technologie d'utilisation de produits ou de procédés qui permet d'exploiter des matériaux à des fins commerciales. Vu l'importance de l'aspect utilitaire, ce sont les applications qui sont les éléments porteurs de cette technologie. Ces 10 dernières années, les nouvelles applications ont surtout été trouvées pour les marchés commerciaux civils où coût et adaptabilité à la production de masse sont des considérations primordiales. La recherche, pour les besoins de la défense, de performances maximales dans un petit nombre de produits au coût élevé, qui incitait à élaborer de nouveaux matériaux, a aujourd'hui perdu de son importance.

58. Les performances et la fiabilité des matériaux de pointe sont déterminées par leur composition et leur microstructure qui donnent aux produits et aux dispositifs des fonctions caractéristiques. Trois grandes tendances, liées à la nécessité de créer avec précision des microstructures ayant les compositions physique et chimique souhaitées, caractérisent la technologie des matériaux de pointe :

a) Effort de miniaturisation des structures. En réduisant la taille physique d'un matériau ou sa microstructure, on en modifie généralement les propriétés. Ainsi, on a constaté une amélioration des propriétés mécaniques, électriques, thermiques et chimiques des matériaux à nanostructure par rapport à celles de matériaux analogues composés de cristaux ou de particules de plus grande taille. Les chercheurs s'efforcent actuellement de mettre au point des méthodes économiques pour obtenir ces nanostructures;

b) Production et caractérisation des matériaux nouveaux nécessaires aux applications hautement spécialisées. Les études prospectives et d'autres travaux ont permis de recenser les besoins futurs dans de nombreux secteurs à forte croissance – instruments biomédicaux, composants informatiques et communications, notamment. Pour répondre à ces besoins, on élabore systématiquement des matériaux nouveaux ou des matériaux plus performants et plus fiables. Par ailleurs, il y a des molécules nouvelles, découvertes par hasard, qui font l'objet de recherches intensives visant à déterminer comment exploiter leurs propriétés exceptionnelles;

c) Formation spontanée d'une microstructure souhaitée à partir de l'utilisation en biologie de la composition moléculaire d'un matériau. La transformation de matériaux en structures élaborées avec précision et souvent très petites, constitue un important obstacle à la production en grande série et à faible coût de dispositifs d'une haute technicité. Les structures biologiques sont constituées d'un assemblage de molécules renfermant les informations codées qui guident cet assemblage. Le concept de formation spontanée de microstructures ayant des fonctions utiles porte à

* La présente section a été rédigée par M. Leslie E. Smith, Directeur du Materials Science and Engineering Laboratory du National Institute of Standards and Technology de l'État du Maryland (États-Unis d'Amérique).

faire des recherches sur les matériaux, notamment dans les domaines qui trouvent leurs applications en médecine et en électronique.

59. Le bref exposé ci-après de l'état actuel de la recherche concernant certains types de matériaux et des problèmes qu'ils posent confirme ces tendances.

Matériaux à nanostructure

60. Ces matériaux ont une structure dont la taille se situe généralement entre 1 et 100 nanomètres, et c'est dans cette fourchette de tailles qu'ils présentent des propriétés nouvelles et utiles. Les propriétés physiques, chimiques et mécaniques de ces matériaux peuvent être très différentes de celles des matériaux de plus grande taille, dont la composition est similaire. Les différences s'expliquent essentiellement par la taille et la distribution dimensionnelle des phases et des structures, la composition chimique des phases et les interactions entre phases qui ont lieu aux interfaces.

61. Les nanocomposites, dotés d'éléments de renfort nanométriques dans une phase continue de métal, de polymère ou de céramique constituent une importante catégorie de matériaux à nanostructure. Des nanocomposites à base de céramique destinés à des applications spéciales sont disponibles dans le commerce. Le renforcement de certains polymères avec de l'argile exfoliée pour obtenir des feuilles à espacement nanométrique améliore sensiblement les propriétés mécaniques de ces polymères et leurs températures de services moyennant une très faible proportion d'additif argileux. Si l'on parvenait à comprendre ce comportement et à l'étendre aux polymères commerciaux ordinaires, ces nanocomposites pourraient concurrencer efficacement des plastiques industriels plus coûteux et trouver de nombreuses applications. En fin de compte, l'avenir des matériaux à nanostructure passe par la mise au point de méthodes de production commercialement viables.

Films et surfaces minces

62. À la surface, un matériau n'a pas les mêmes propriétés qu'à l'intérieur, et ses propriétés de surface sont d'autant plus importantes qu'il est de petite taille. Les performances et la fiabilité de nombreux matériaux avancés sont fonction des microstructures de leur surface et de leurs interfaces. Pour les besoins de l'électronique et des communications de pointe, on s'est beaucoup intéressé à la production et à la modification des films de surface de structures et de compositions élaborées avec précision.

63. Plusieurs procédés ont été mis au point pour la fabrication de ces matériaux. Le dépôt chimique en phase vapeur, la métallisation physique par vaporisation, ainsi que les méthodes employant lasers et faisceaux électroniques ou ioniques sont devenus des techniques fiables de fabrication de couches minces. La technique du dépôt chimique en phase vapeur consiste à obtenir le dépôt d'une couche mince à haute température, le plus souvent sur du silicium, de la céramique et des substrats de carbone. La métallisation physique par vaporisation qui est opérée à température moins élevée (moins de 500°) peut donc servir pour le revêtement de matériaux ferreux.

64. On connaît depuis une cinquantaine d'années des procédés de synthèse à haute pression qui sont utilisés pour la production de diamants. Ce n'est toutefois que récemment que l'on a mis au point des procédés performants et (parfois) relativement économes en énergie pour la synthétisation de couches de diamant ou de carbone diamantoïde. Sur le plan commercial, on s'intéresse de plus en plus activement aux possibilités d'utilisation des couches de diamant ou de carbone diamantoïde, d'une part, sur les circuits électroniques, car leur haute conductivité thermique et leur caractère d'isolant électrique leur confèrent des propriétés exceptionnelles et, d'autre part, pour le découpage et le meulage de surfaces d'outils.

Structures carboniques amorphes

65. On a pensé pendant longtemps que le carbone n'existait que sous deux formes fondamentales, caractérisées par le diamant et le graphite. Le diamant a pour structure un cristal tridimensionnel alors que le graphite est un empilement de couches bidimensionnelles. Or, on a découvert en 1985 une nouvelle classe de molécules de carbone qui se forment dans des arcs à haute température et, à la suite de cette surprenante découverte, on s'est activement préoccupé d'en exploiter les propriétés exceptionnelles. Ces composés sont appelés «fullerènes» parce que leurs formes courbes rappellent celles qu'utilisait le célèbre architecte Buckminster Fuller. Celui qui a la forme la plus symétrique est le C_{60}, sphère creuse contenant 60 atomes de carbone. Ces composés ont des propriétés assez inhabituelles, notamment une grande solubilité dans les solvants et une pression de vapeur exceptionnellement élevée pour des composés constitués uniquement de carbone. On a découvert de nouvelles méthodes de synthèse qui permettent d'obtenir ces composés en quantités suffisantes pour procéder à des recherches poussées. La structure en forme de cage de ces composés a incité les chercheurs à en utiliser l'intérieur creux pour loger différents atomes qui peuvent y être protégés ou être transférés à d'autres sites. Ces matériaux pourront être un jour utilisés comme catalyseurs, supraconducteurs, matériaux de stockage de l'hydrogène ou convertisseurs photovoltaïques. On peut par exemple intercaler le C_{60} entre trois atomes de métal alcalin pour obtenir des

supraconducteurs qui ne le cèdent qu'aux supraconducteurs en céramique pour ce qui est de la température de supraconductivité.

66. Les nanotubes sont des fullerènes géants à structure tubulaire constitués de nombreux tubes concentriques. Leurs propriétés électriques, thermiques et mécaniques exceptionnelles sont dues à leur forme géométrique et à leur dièdre positif. On n'a pas encore exploité commercialement les fullerènes ni leurs dérivés mais de très intéressantes recherches faites ces quatre dernières années donnent à penser que la prochaine décennie verra d'importantes applications de ces matériaux dans des produits et dispositifs divers.

Céramiques structurales

67. Les céramiques techniques structurales sont utilisées dans des applications pour lesquelles les principaux paramètres de performance sont la résistance mécanique à haute température, la résistance à l'usure, la faible densité, la résistance à la corrosion, la dureté, la rigidité et la légèreté. Ces propriétés rendent ces matériaux particulièrement intéressants dans les secteurs de l'énergie, de l'aérospatiale et de la défense. Ils sont actuellement utilisés pour les pièces résistant à l'usure (joints et soupapes), les outils coupants, les roulements et les revêtements de protection thermique. Les pièces résistant à l'usure constituent le marché le plus important pour les matériaux structuraux avancés.

68. Au cours des 10 prochaines années, les céramiques techniques structurales seront de plus en plus utilisées dans des produits tels que échangeurs de chaleur, moteurs thermiques et biocéramiques. Aux États-Unis, on prévoit que la demande pour ces applications et d'autres représentera 2 à 3 milliards de dollars d'ici à l'an 2000. Cette croissance dépend toutefois de la capacité des industries à surmonter, sur les plans techniques et économiques, les importants obstacles à une plus large utilisation de ces céramiques. Il faudra notamment améliorer leurs performances et leur fiabilité et, pour cela, perfectionner les techniques de fabrication et réduire les coûts de leurs composants afin qu'elles puissent mieux rivaliser avec les matériaux classiques.

Matériaux composites

69. Dans les années 80, l'intérêt pour les matériaux composites est monté en flèche, surtout parce qu'on s'est rendu compte des propriétés mécaniques, électriques, optiques et chimiques que ces matériaux pouvaient acquérir s'ils étaient nanocristallins. Les matériaux composites sont obtenus par l'intégration d'un matériau de renfort structural dans une deuxième substance ou matrice. Leur comportement et leurs propriétés sont déterminés par la forme et la disposition structurale de leurs composants, par leur composition et par l'interaction entre composants.

70. La recherche sur les composites à matrice céramique, à matrice métallique et intermétallique, et à matrice polymère est très active. Les composites à matrice céramique sont soit à renforcement continu soit à renforcement discontinu. Les premiers, ou ceux constitués d'un assemblage de fibres céramiques noyées dans une matrice céramique, sont actuellement au stade de la précommercialisation et destinés à des applications soumises à une température et à des contraintes élevées (échangeurs de chaleur à haute pression, convertisseurs, tuyères et joints de turbines à gaz, par exemple). Les seconds, pour lesquels une phase de renforcement s'ajoute à une phase matricielle, en sont au début de leur commercialisation. Parmi les applications actuelles, on peut citer les outils coupants, les pièces soumises à usure, les matrices de mise en boîtes, les filières d'extrudeuses, les blindages et les radômes. On estime qu'il existe actuellement aux États-Unis un marché de plus de 200 millions de dollars pour les composites à matrice céramique, dont surtout les matrices à renforcement discontinu.

71. La technologie des composites à matrice polymère est plus avancée que celle des composites à matrice céramique. Les premiers sont exploités commercialement dans de nombreux secteurs – matériel médical, exploitation pétrolière en mer, transports, construction et activités maritimes notamment. L'utilisation des composites à matrice polymère ne pourra se développer que si on arrive à mieux prévoir leurs performances à long terme et à mettre au point des méthodes de fabrication plus économiques.

72. Les composites à matrice métallique sont des matériaux techniques qui contiennent une ou plusieurs phases internes de renforcement implantées dans la matrice métallique ou intermétallique au cours de la fabrication. Ces composites présentent des avantages évidents par rapport aux alliages métalliques non renforcés : légèreté, plus grande résistance à l'usure et aux chocs, faible coefficient d'expansion thermique, résistance et rigidité plus grandes. Étant très coûteux à fabriquer, ces matériaux sont utilisés dans des créneaux spécialisés (missiles, composants d'engins spatiaux, aéronefs spéciaux, par exemple). À l'avenir, les composites à matrice métallique et intermétallique trouveront leurs applications dans les cellules et certaines parties du revêtement des avions, les moteurs à turbine des futures générations d'avions militaires et les avions spatiaux nationaux. La réduction des coûts volumétriques pourrait susciter une forte demande de ces matériaux d'ici deux à trois ans, en particulier dans l'industrie automobile.

Couches magnétiques minces

73. Au cours des 10 dernières années, les couches magnétiques minces ont remplacé les particules d'oxyde métallique comme source de flux magnétique sur les disques durs servant de support d'enregistrement magnétique. Ces films multicouches structurés avec précision ont une magnéto-résistance colossale, et subissent une modification importante de leur conductivité électrique quand on inverse l'orientation du champ magnétique. Dans l'ensemble, on comprend le phénomène, mais les nombreux facteurs qui déterminent la réaction des systèmes dans la pratique font encore l'objet de recherches intensives. Les techniques utilisées actuellement pour maîtriser les microstructures de ces matériaux ont permis d'obtenir des disques à couches minces d'une capacité de 500 Mo/pouce^2, qui devrait atteindre 10 Go/pouce^2 dans les 10 prochaines années.

Matériaux intelligents

74. Les matériaux intelligents sont les matériaux capables de «sentir» les stimulus externes (chaleur, pression, tension électrique, lumière, etc.) et d'y répondre de façon adéquate et hautement spécifique. Les différents types de matériaux intelligents sont les polymères piezoélectriques, les polymères conducteurs, les céramiques piezoélectriques et à effet d'électrostriction, les fluides électrorhéologiques, les fluides magnétorhéologiques, les revêtements électrochromiques, les matériaux à effet de magnétostriction, les engins intégrés micro-usinés, les polymères et les gels biomimétiques, les alliages et polymères à effet de mémoire. Ces matériaux se trouvent à différents stades de recherche-développement ou de commercialisation.

75. Les matériaux électromécaniques piezoélectriques occupent la plus grande part du marché des matériaux intelligents. Ce sont des matériaux électromécaniques qui réagissent au courant électrique par un changement de dimensions. Ils trouvent leurs principales applications dans des produits de consommation tels qu'appareils chronométriques, dispositifs autofocus pour caméra vidéo et positionneurs de tête de disque dur informatiques, ces applications ayant contribué au développement d'une industrie représentant près d'un milliard de dollars.

76. Les matériaux chromogéniques changent de couleur sous l'effet de stimulus externes. Les recherches actuelles portent essentiellement sur les matériaux électrochromiques (tension électrique), thermochromiques (chaleur) et photochromiques (lumière). Les revêtements chromogéniques pour le verre utilisé dans l'automobile et dans la construction sont parmi les matériaux intelligents ceux qui recèlent peut-être le plus grand potentiel de croissance économique. Cependant, à court terme, la croissance se fera dans le domaine des capteurs micro-usinés à silicium intégré. La sécurité, le contrôle du bruit et des vibrations et les structures avec capteurs à fibres optiques offrent aussi des débouchés très prometteurs pour les matériaux intelligents. Le secteur militaire et de la défense perd de l'importance et l'avenir appartiendra de plus en plus aux applications à double usage civil et militaire.

77. Les matériaux biomimétiques réagissent aux stimulus chimiques et électriques par des changements de taille ou de diffusivité chimique. Ce sont d'excellents imitateurs des systèmes biologiques. Bien que les polymères et gels biomimétiques en soient encore au stade de la recherche-développement, il sera un jour possible de les utiliser comme capteurs biologiques et prothèses neurales.

78. Les alliages et polymères à effet mémoire peuvent retrouver leur forme initiale s'ils sont réchauffés après avoir été déformés thermomécaniquement. Les alliages sont utilisés commercialement dans les arcs dentaires, les montures de lunettes et les actionneurs thermiques à ressort spiral. Quant aux polymères, on les trouve dans le commerce sous des formes d'usage commode, telles que granules, solutions et liquides. Leurs propriétés sont utilisées en médecine, dans l'industrie et dans des produits de consommation sous la forme notamment de cathéters et d'équipements de protection moulés à façon.

79. Les polymères conducteurs peuvent changer de couleur et de conductivité sous l'effet de stimulus chimiques et électroniques. Ils trouvent un usage commercial dans les batteries secondaires et les revêtements de protection contre le brouillage radioélectrique et les perturbations électromagnétiques.

Matériaux électroniques

80. Les dispositifs électroniques actifs à base de matériaux polymères semblent avoir aujourd'hui un certain potentiel commercial, peut-être même un potentiel considérable. Les performances des diodes électroluminescentes (DEL) polymères sont déjà comparables à celles des DEL inorganiques. Les matériaux polymères peuvent être déposés sur des substrats légers souples, offrant ainsi une très grande liberté aux concepteurs de nouveaux appareils. La couleur particulière émise par le matériau est déterminée par une molécule dopante, si bien que des couleurs différentes peuvent provenir du même polymère de base. On a mis au point des transistors polymères utilisables dans des circuits intégrés assez simples. Qu'il s'agisse de la vitesse ou de la densité, ces dispositifs ne risquent pas de rivaliser de sitôt avec leurs concurrents à base de silicium, si tant est qu'ils le puissent un jour, mais ils présentent l'avantage de la souplesse quand ils sont montés sur un substrat souple. D'autres composants électro-optiques

– guides d'ondes, commutateurs et modulateurs – ont déjà été utilisés à titre expérimental et certains d'entre eux pourraient bien se retrouver parmi les petits composants bon marché de systèmes de communication ou de calcul à fibres optiques.

81. Les défis techniques que posent encore ces matériaux ont trait à la possibilité de prolonger leur durée de vie et de mettre au point des procédés de fabrication permettant une production nombreuse et peu coûteuse. Les durées de vie se sont déjà considérablement allongées du fait de l'amélioration des techniques de fabrication.

Assemblages supramoléculaires

82. Aussi bien les polymères naturels que les polymères synthétiques peuvent être conçus pour former de gros assemblages aux propriétés utiles. Les assemblages les plus largement étudiés sont les monocouches auto-assemblées formées par des molécules, dotées de la bonne structure, qui se rangent spontanément pour former des couches uniformes et ramassées sur un substrat approprié. Du fait du caractère spontané de la formation des couches, les dispositifs contenant ces matériaux pourraient être fabriqués à bas prix et en grand nombre. Ces matériaux pourraient également permettre l'autoréparation des couches endommagées grâce à l'assemblage de molécules supplémentaires aux endroits à réparer. À la surface, les couches peuvent servir de support à des groupes de fonctions très variées rendant possibles des tâches spécifiques. Elles peuvent, par exemple, posséder un site de fixation de tel ou tel produit chimique et servir ainsi de capteur, ou encore un site qui imite un facteur physiologique en vue de produire une réaction souhaitée dans un organisme vivant. Elles peuvent aussi servir de support au développement de tissus de remplacement. On a proposé d'employer comme micromotifs de circuits électroniques des monocouches auto-assemblées dont les propriétés mouillantes permettent de protéger la surface de silicium et ainsi d'abandonner la photolitographie classique. On a produit des assemblages tridimensionnels plus élaborés grâce à des procédés de synthèse complexes. Les molécules pourront avoir des fonctions d'autant plus complexes que l'on comprendra mieux les principes qui régissent leur assemblage.

Conséquences de l'évolution technologique

83. Les effets sociaux, économiques et politiques de l'évolution technologique de ces matériaux sont liés aux applications qu'ils rendent possibles. Les applications les plus faciles à prévoir se trouvent dans l'électronique et les communications, domaines où la création de nouveaux matériels et les tendances du marché sont bien établies et ne montrent aucun signe de fléchissement. L'augmentation de la puissance de calcul offerte pour un prix donné se poursuit à un rythme qui ne s'est pas démenti depuis 10 ans. La télécommunication est très répandue et en forte expansion, ordinateurs et téléphones portables se faisant de plus en plus petits et légers. Partout dans le monde, l'information est ainsi mise à disposition d'un nombre de personnes jusqu'alors jamais atteint, ce qui change à coup sûr la façon dont chacun se perçoit et celle dont les gouvernements contrôlent et dirigent leurs citoyens. L'avancée des matériaux intelligents et des capteurs auxquels ils servent de base va permettre de mettre au point des systèmes de détection hautement spécifiques capables de protéger contre les menaces chimiques ou biologiques, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique. Grâce aux matériaux de pointe, la médecine devrait pouvoir faire des progrès spectaculaires. La croissance de cellules vivantes sur support artificiel en vue de la production de nouvelles cellules, de tissus ou même d'organes entiers semble déjà possible, et est peut-être même sur le point de devenir réalité.

84. Le principal moteur de la technologie des matériaux demeure la nécessité de mettre au point et de fabriquer des matériaux prévisibles quant à leurs performances et à leur fiabilité. Les performances des matériaux présents dans les dispositifs et produits finis sont déterminées par la taille et la composition de leurs microstructures, et leur assemblage se fait aujourd'hui à l'échelle atomique et moléculaire grâce à des procédés de fabrication bien maîtrisés. Les matériaux avancés continuent de pénétrer le marché, en s'insérant le plus souvent d'abord dans des créneaux spécialisés où les performances priment sur le coût. L'expansion commerciale des matériaux avancés ou moléculaires dépendra de notre capacité de mettre au point des techniques de fabrication fiables à un coût permettant de soutenir la concurrence des matériaux classiques.

D. Technologies de l'information*

85. La taille et le prix des processeurs et des commutateurs de données ont continué de diminuer et leur vitesse d'augmenter à un rythme pour le moins exponentiel. La distribution de l'information sous forme numérique a connu des progrès spectaculaires favorisés par l'amélioration de l'infrastructure des communications, le développement des protocoles d'échange et les logiciels autonomes. Le stockage, le traitement et l'utilisation de données non alphanumériques ont également beaucoup progressé, et notre capacité d'explorer l'environnement grâce à des systèmes plus petits et plus

* La présente section a été rédigée par Mme Janet Aisbett, Directrice, School of Management and School of Information Technology, Université de Newcastle, Newcastle, Australie.

intégrés est allée de pair avec les progrès des effecteurs de robot. Toutefois, les difficultés inhérentes à la mise au point de grands systèmes continue de freiner la progression vers des réseaux mondiaux d'information.

86. Décrire l'évolution enregistrée depuis le rapport de 1990 incite à rappeler un constat qui a déjà été formulé, à savoir que les technologies de l'information fournissent les instruments et les techniques nécessaires à la gestion et à l'utilisation de l'information et peuvent, de ce fait, intervenir dans toutes les activités civiles et militaires, qu'il s'agisse de simples informations de contrôle du fonctionnement des machines ou d'arguments stratégiques ou philosophiques de haut niveau.

87. L'impact des technologies de l'information, comme celui de toutes les autres technologies, ne peut être évalué qu'en fonction de leurs applications. L'impact des applications dépend à son tour de plusieurs éléments : la combinaison de technologies de l'information et d'autres technologies, débouchant sur des dispositifs ou des systèmes; les procédures suivies pour mettre au point et utiliser ces dispositifs ou ces systèmes; et la réaction sur le plan humain et celui de l'organisation, aux applications qui en découlent. Les principaux indicateurs montrent que les effets des technologies de l'information n'ont pas cessé de se multiplier et de se diversifier, qu'il s'agisse des secteurs d'application, de la gamme des biens et produits qu'elles contribuent à engendrer, de la rapidité avec laquelle elles sont adoptées et du soutien des investisseurs[26]. L'énorme expansion de la base de données numériques constituée dans le monde au cours des 10 dernières années, couramment désignées par l'expression «ère de l'information», a créé une dépendance économique et militaire à l'égard des systèmes d'information[27]. La dualité des technologies de l'information – leur avantage concurrentiel et leur sensibilité stratégique – soulève donc de nouveaux problèmes de sécurité pour le siècle à venir.

Progrès des techniques de traitement et de communication

88. À la base du développement des technologies de l'information se trouve le processeur électronique, dont la miniaturisation extrêmement rapide s'est accompagnée d'une réduction correspondante des temps de traitement, des coûts, des dimensions et des poids[28]. L'amélioration des performances devrait se poursuivre grâce à l'intégration plus poussée des fonctions dans une même puce.

89. Cependant, les principaux progrès intervenus, dans le domaine des technologies de l'information au cours des huit dernières années ont été la mise en réseau des systèmes informatiques et les technologies liées à l'Internet. Ce sont les industries de l'informatique, de l'électronique et des médias qui, par leurs innovations et grâce à l'accord portant sur les normes régissant l'interopérabilité, ont contribué à l'adoption révolutionnaire de l'Internet. De nombreuses statistiques ont été publiées sur la diffusion de l'Internet. Selon certaines estimations[29], on devait atteindre le chiffre de 122 millions d'utilisateurs au milieu de 1998, dont près de 60 % en Amérique du Nord, contre 0,75 % seulement actuellement en Afrique.

90. L'implantation de l'Internet continuera de dépendre du développement de l'infrastructure des communications. Dans les nations développées, les fibres optiques à large bande remplacent les câbles en cuivre, la technologie intégrée des fibres optiques étant appelée à apporter remède aux problèmes de la commutation des communications. On commence maintenant à disposer de capacités de plusieurs mégabits/seconde pour les services offerts aux particuliers.

91. La diffusion de l'Internet dans les pays qui ne disposent pas d'une bonne infrastructure terrestre de communications sera fonction de l'augmentation de la capacité de communication par satellite et de la baisse des coûts de ces communications. Il faudra, pour ce faire, mettre en place des émetteurs plus puissants, améliorer la compression numérique et réduire les coûts de lancement et ceux des stations au sol. Comme autre avancée possible, on peut citer les communications hertziennes assurées à partir de plates-formes aéronautiques à haute altitude et susceptibles de permettre la mise en place rapide de services de communication à large bande.

92. Le World Wide Web, en tant que technologie de l'Internet, doit son succès exceptionnel au fait qu'il a su exploiter des innovations dans le domaine des produits multimédias numériques interactifs. Il a considérablement assoupli l'échange des informations, par rapport aux modes de communication, de partage des informations et de divertissement dont on disposait auparavant (téléphone, livre et télévision, par exemple). C'est à peine si on a commencé à exploiter la possibilité d'offrir au plus grand nombre le bénéfice de connaissances et de compétences éparses dans le monde en diffusant des actes spécialisés réalisés sous supervision – tels que des actes chirurgicaux – et en dispensant un enseignement à distance. Étant donné que l'accès au Web se généralise, on peut espérer rétablir l'équilibre en matière d'information entre les nantis et les démunis, sur les plans à la fois intranational et international.

93. Cette évolution sera facilitée par les techniques de compression, qui permettent d'utiliser plus efficacement la largeur des bandes de communication et les capacités de stockage numérique dont on dispose actuellement. Ces techniques seront promues par des organismes normatifs

tournés vers l'avenir tels que le «Moving Pictures Expert Group»[30]. On réalise une compression efficace en appliquant des méthodes dites intelligentes qui interprètent partiellement les données brutes et modifient ainsi non seulement les besoins d'infrastructure de communication et de stockage mais aussi la capacité d'interpréter automatiquement les informations comprimées, ce qui permet d'en améliorer la recherche et le filtrage.

Multimédia

94. Par rapport aux questions purement techniques telles que celles qui concernent les processeurs, les compilateurs, etc., les questions liées à l'information proprement dite occupent dans les activités de recherche en matière de technologies de l'information une place de plus en plus importante, qu'il est toutefois difficile d'évaluer avec précision en raison de la diversité de ces activités. La technologie multimédia numérique interactive associe des outils de traitement et de présentation de l'information qui, jusqu'à présent, étaient mis au point séparément, notamment ceux qui ont trait à l'image, au son, au texte ou aux données spatiales. Ainsi, la formation nécessaire à la conduite d'opérations civiles ou militaires dangereuses ou coûteuses s'appuie sur les technologies de l'information dont sont issues les salles de cours électroniques, la réalité virtuelle et les simulateurs. Le potentiel qu'offrent les technologies connexes sur le plan éducatif commence à peine à être exploité.

95. Aujourd'hui, la recherche dans le domaine des sciences cognitives permet de mieux comprendre la manière dont les êtres humains utilisent ce type d'information. Il sera ainsi de plus en plus facile de rechercher automatiquement des informations sur la tâche à effectuer, qu'elles soient contenues dans une image, un fichier texte, etc. D'intenses efforts de recherche permettront également de mieux filtrer les informations pour éviter la surinformation. Le fait de pouvoir localiser et filtrer les informations plus facilement offre des garanties de sécurité, qu'il s'agisse d'activités de surveillance autorisées ou d'espionnage.

Évolution des méthodes de détection et de la robotique

96. Les technologies de l'information ont fait des progrès qui ont permis d'intensifier la collecte d'informations et les activités de surveillance d'intérêt commercial ou militaire. Déjà, des renseignements sont recueillis dans le monde entier 24 heures sur 24 grâce aux possibilités de connectivité offertes par Internet et aux améliorations apportées aux dispositifs de positionnement, de détection et de surveillance. Ceux-ci ont bénéficié d'un ensemble d'innovations dans les techniques utilisant des capteurs actifs et passifs, dans l'infrastructure de traitement et dans les algorithmes de traitement qui s'appuient sur des modèles complexes de l'environnement et du capteur.

97. Grâce à la miniaturisation et aux progrès technologiques, on pourra continuer à réduire le coût et la dimension des capteurs, comme on l'a fait pour les processeurs. Les réseaux coordonnés de petits capteurs intelligents renforcent, à moindre frais, les capacités de collecte de renseignements, de surveillance et de reconnaissance. De plus, la multiplication des ressources informatiques et les progrès de la modélisation de l'environnement et des autres techniques de modélisation qui s'appuient sur des capteurs continueront à accroître l'utilité des données provenant de sources multiples, notamment les données optoélectroniques, infrarouges, acoustiques et sismiques recueillies par des capteurs au sol isolés ou encore les données infrarouges ou radar collectées par les systèmes de surveillance aérienne. Les données de ce type peuvent être traitées sur place, comprimées, transmises, analysées et enfin stockées dans des bases de données pour être utilisées, à moindre frais, à des fins civiles ou militaires ou encore aux fins du maintien de la paix (repérage des armements, suivi de leur élimination, etc.).

98. Les progrès technologiques réalisés dans le domaine des transports, associés à la miniaturisation des capteurs, ont permis de mettre au point des unités de surveillance plus petites, plus mobiles et plus autonomes. On fabriquera bientôt des «microrobots» bon marché et de très petite taille, que l'on pourra associer pour exécuter des tâches complexes. Grâce aux moyens de contrôle et de communication intelligents et à des équipements sensoriels de plus en plus perfectionnés, il est possible de mettre au point des véhicules autonomes non habités plus performants qui commencent seulement à jouer un rôle important sur les plans militaire et commercial, comme on l'avait prévu depuis plusieurs décennies. Or, les drones ou autres véhicules autonomes dont le coût est relativement faible et qui sont commercialisés pour des tâches telles que la surveillance des accidents de la circulation risquent d'être détournés à des fins militaires ou terroristes. De manière générale, les nouvelles possibilités qu'offrent les véhicules autonomes permettront bientôt à un pays de livrer combat en échappant à la contrainte imposée par la réaction de l'opinion publique face aux pertes en vies humaines. Il est également préoccupant de constater qu'avec la diminution des coûts, cette technologie est de plus en plus facilement accessible.

99. Les «assistants personnels numériques» permettent d'améliorer l'efficacité humaine dans plusieurs domaines. Les vêtements «intelligents», qui contiennent des dispositifs permettant de capter, de traiter et de diffuser des informa-

tions, ne seront bientôt plus réservés aux usages médicaux ou militaires. Plus généralement, les systèmes d'information conçus pour exécuter des tâches spécifiques telles que le contrôle des moteurs ou l'écoulement de la circulation seront de plus en plus utilisés car ils coûteront de moins en moins cher et seront de plus en plus robustes grâce aux systèmes de la nouvelle génération qui tiennent sur une seule puce reliée à des capteurs tels que le Système mondial de localisation différentielle[31]. On associe désormais les techniques de détection, de traitement et de commande pour mettre au point des armes et des systèmes d'armement autonomes.

La guerre informatique et les utilisations illicites de l'information

100. Étant donné qu'il est difficile et, finalement, peu avantageux de se maintenir à la pointe du progrès en matière d'armement, les pays les plus pauvres continueront de miser sur les armes relativement économiques et rudimentaires, de même que les terroristes (qui feront peut-être également appel à des forces mercenaires disposant d'équipements de haute technologie). Pour les mêmes raisons, les pays les plus pauvres et les groupes terroristes seront peut-être tentés par les avantages politiques que la déstabilisation offre par rapport à l'utilisation d'armes sophistiquées.

101. À l'ère de l'information, on peut dire que la déstabilisation est une opération relativement aisée car l'impact que peut avoir la guerre informatique est sous-estimé dans le secteur civil, bien que les médias aient largement rapporté diverses tentatives de pénétration, sur Internet par exemple[32]. La protection qu'offriront les dispositifs et protocoles de cryptage de la nouvelle génération ne sera efficace ni contre les agresseurs qui utiliseront des moyens très sophistiqués ni contre ceux qui se livreront à des attaques brutales à l'aide de moyens très rudimentaires. Les groupes terroristes et les petits États qui ne disposent pas de ressources financières importantes ont véritablement la possibilité de paralyser des services essentiels. En revanche, le perfectionnement des méthodes de cryptographie rendu nécessaire par les exigences du marché permettra de repérer plus facilement les marchands d'armes, les criminels et les terroristes.

102. Dans le secteur militaire, les avantages offerts par la connectivité et l'interopérabilité des systèmes ont permis de conclure qu'il valait mieux gérer les risques que les éviter, ce qui se vérifie particulièrement dans le cas des systèmes C3I. Dans les pays de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord et dans les pays similaires, ces systèmes sont, dans l'ensemble, encore très sûrs mais la guerre informatique y a mobilisé des fonds importants et a donné naissance à une série de termes nouveaux tels que cyberopérations, cyber-attaques ou cybermunitions. La guerre informatique est comparable au terrorisme, en ce sens qu'il est difficile d'identifier des agresseurs contre lesquels riposter. Les systèmes militaires et civils font régulièrement l'objet d'attaques de faible niveau de la part d'individus isolés.

103. De même qu'elles ont renforcé les moyens de communication licites, les technologies de l'information ont bénéficié aux réseaux criminels internationaux, permettant à des groupes isolés, notamment des pornographes, d'échanger des informations et de mener d'autres activités illégales. Il existe désormais de nouveaux moyens de commettre des délits, en particulier grâce à la fausse monnaie électronique, l'espionnage industriel et les autres activités de fraude de portée internationale utilisant les télécommunications[33].

Tendances de l'évolution des technologies de l'information

104. Pour ce qui est de l'évolution des technologies de l'information, les activités de recherche-développement civiles continueront de prendre le pas sur les activités militaires et les liens entre industrie, universités et pouvoirs publics se resserreront encore. Dans le même temps, les équipements militaires à base de composants vendus dans le commerce seront de plus en plus souvent produits par des entreprises commerciales. En effet, les produits disponibles sur le marché coûteront toujours moins cher que les produits sur mesure et, avec les progrès de la miniaturisation, le matériel standard est de plus en plus performant.

105. Dans le domaine des technologies de l'information, on constate que, partout, les petits concepteurs et fabricants spécialisés se multiplient rapidement. Cela est dû en partie au fait que l'accès aux hautes technologies coûte de moins en moins cher du fait de la baisse généralisée du prix des composants et des outils tels que le génie logiciel assisté par ordinateur. En raison de cette tendance, il pourrait devenir difficile de contrôler la fabrication de produits à moyenne intensité technologique qui offrent un potentiel intéressant sur le plan militaire.

106. On constate également que les concepteurs et les vendeurs de technologies de l'information se sont résolument tournés vers la mise en place d'architectures de systèmes, tant dans le secteur civil que dans le secteur militaire[34]. Les armes et les systèmes de détection sont désormais dotés d'architectures radicalement nouvelles qui permettent d'apporter, au fil du temps, des améliorations modulables. Néanmoins, il restera difficile de maîtriser les dépenses et le temps nécessaires à l'application et à la gestion des grands systèmes logiciels tels que ceux utilisés dans les C3I, ce qui contrastera fortement avec la diminution du coût et le perfectionnement des composants des systèmes d'information. Les causes en

sont la complexité croissante des besoins, la demande d'intégration ou de connectivité transparente et le manque de dynamisme des chercheurs spécialisés dans les systèmes d'information[35].

107. Le secteur militaire et le secteur civil se heurtent tous deux aux difficultés que pose la mise au point de gros systèmes ce qui, depuis peu, les a conduits à centraliser la conception et la gestion. Ceux qui commercialisent des solutions intégrées ont acquis un pouvoir énorme sur le marché civil mondial. C'est notamment le cas de Microsoft et de SAP AG qui ont pris le contrôle de plusieurs segments de marché et ont formé des alliances. Ces grandes sociétés remettent en cause les pouvoirs traditionnellement détenus par les États. À la tendance actuelle qui conduit les grandes compagnies à dominer la production de logiciels dans certains secteurs correspond l'entrée en scène des grandes multinationales qui assurent la prise en charge des systèmes d'information, ce qui peut être attribué au fait que ceux qui sont traditionnellement chargés de le faire (à l'intérieur de l'entreprise) ne remplissent pas leur contrat. Néanmoins, la tendance à la centralisation pourrait bien s'inverser durant les 10 années à venir, au fur et à mesure que l'on mettra au point des moyens plus intelligents de traverser les frontières des systèmes et sous-systèmes d'information grâce à la médiation et à la traduction.

Perspectives

108. Nous sommes à l'ère de l'interconnectivité mondiale et il n'est pas réaliste de penser que les frontières nationales peuvent empêcher l'information de circuler. La diffusion transnationale des informations sur Internet aura à la fois un effet stabilisateur et un effet déstabilisateur, avec des incidences complexes sur les plans culturel, politique, juridique et commercial. L'influence néfaste de ceux qui diffusent de la propagande ou des informations sur le Web dans des buts répréhensibles est contrebalancée par une série d'applications qui jouent un rôle stabilisateur, allant de la gestion des situations de crise à la sensibilisation à des questions telles que les armes biologiques. Le Web permet de réduire considérablement les contraintes que représentent la langue, le temps et la distance. La communauté universitaire mondiale a été l'un des premiers bénéficiaires d'Internet et aujourd'hui, une partie au moins des écoliers de presque toutes les régions du monde peuvent entrer directement en contact avec leurs camarades.

109. Les applications commerciales des technologies de l'information ont modifié les rapports de force entre les sociétés privées et les pouvoirs publics. Un nombre croissant d'entreprises ont une production annuelle supérieure au produit national brut. Les pays industrialisés cherchent à les séduire, et dans le domaine des technologies de l'information, en particulier, les entreprises peuvent choisir librement les pays qui offrent les conditions les plus favorables à l'implantation d'usines ou de sociétés de services et d'ingénierie en informatique.

110. Les progrès accomplis dans le domaine des technologies de l'information ont transformé les services financiers et les marchés boursiers grâce à la possibilité, par des moyens électroniques, de collecter des informations à l'échelle mondiale, de suivre les prix et d'utiliser de nombreux instruments financiers. Le commerce de détail change de visage : les consommateurs ont recours aux virements électroniques et certains services sont fournis en ligne. Les instruments financiers bénéficiant d'un soutien public font l'objet d'une concurrence accrue.

111. Dans ce contexte, il faut constamment réactualiser les législations relatives aux pratiques commerciales et à la protection du consommateur qui, traditionnellement, ne prennent en compte que le cadre national[36]. Les pays seront contraints de s'adapter et de s'entendre pour décider de la base sur laquelle ils prélèveront des taxes sur les produits, services et transactions transnationaux et, dans de nombreux domaines, il sera de plus en plus difficile, voire impossible, d'appliquer une réglementation strictement nationale.

112. Néanmoins, les arguments commerciaux en faveur de la spécificité culturelle ou nationale pourraient s'avérer plus efficaces que la réglementation. La diversité culturelle, religieuse et raciale a déjà résisté à de nombreuses avancées technologiques. Parce qu'elle permet de cultiver ces différences tout en éliminant les malentendus qu'elles pourraient engendrer, l'ère de l'information suscite le plus vif espoir que nous n'ayons jamais eu de parvenir à une vision commune de la paix.

E. Biotechnologie*

113. Depuis la publication en 1990 du rapport du Secrétaire général sur «Les progrès scientifiques et techniques et leurs incidences sur la sécurité internationale», l'opinion publique internationale s'inquiète de plus en plus de la prolifération des armes biologiques et de l'utilisation qui peut en être faite par des dirigeants nationaux agressifs et par des terroristes. Il y a trois raisons principales à cet état de choses : a) les agissements du groupe terroriste Aum Shinrikyo au Japon; b) les révélations concernant le programme, considérable et

* La présente section a été rédigée par M. Raymond A. Zilinkas, chargé de cours au Center for Public Issues on Biotechnology, de l'Institut de biotechnologie de l'Université du Maryland (États-Unis d'Amérique).

très avancé, de guerre biologique dans l'ex-Union soviétique; c) les découvertes faites par la Commission spéciale sur les capacités de guerre biologique de l'Iraq. La presse écrite a aussi, naturellement, publié nombre d'histoires saugrenues sur la menace que représentent les armes biologiques, ainsi que sur les techniques biotechnologiques auxquelles ont recours des scientifiques sans scrupule qui cherchent à créer des agents pathogènes bactériens et viraux de plus en plus dangereux avec lesquels munir ces armes. En réalité, l'utilisation des procédures de la biologie moléculaire à des fins militaires ou ignobles en est, pour le moment, à un stade purement théorique.

114. Par contre, ce qui n'est pas théorique, c'est que la recherche en biologie moléculaire a eu pour conséquence la mise au point de nombreuses techniques ultraperfectionnées utilisées dans la recherche fondamentale et appliquée, le développement de nouveaux produits et procédés, la production industrielle de produits pharmaceutiques et de spécialités chimiques, etc. Ce qui présente un intérêt pour le présent rapport, c'est que la biologie moléculaire a mis à la disposition des responsables de la santé publique d'excellentes méthodes permettant de déceler les agents pathogènes et les toxines présents dans l'environnement et dans les ouvrages; de diagnostiquer et de soigner les personnes, les animaux et les plantes malades; et de suivre le mouvement des agents pathogènes au cours des épidémies et des pandémies. Comme on le verra ci-après, les responsables de la biodéfense et de la maîtrise internationale des armements peuvent également avoir recours à ces techniques mises au point, dans une large mesure, au cours de travaux ayant des fins pacifiques[37].

115. Le rapport de 1990 décrivait et examinait l'évolution de la biotechnologie. Mais les développements considérables qui ont eu lieu dans ce domaine au cours des huit dernières années obligent à présenter ici une mise à jour de ce rapport. En conséquence, la présente section se compose de quatre parties. La première donne un rapide aperçu général des activités pertinentes relatives à la maîtrise des armements. La deuxième examine les plus importantes de ces nouvelles biotechniques. La troisième aborde la question du champ d'application des nouvelles biotechniques à la biodéfense et à la maîtrise des armements. La quatrième porte sur les futurs développements possibles.

Aperçu général des activités pertinentes relatives à la maîtrise des armements

116. Les inspecteurs de la Commission spéciale qui travaillent en Iraq ont employé un large éventail de techniques biologiques, chimiques et physiques pour mettre au jour le programme iraquien sur les armes de destruction massive[38]. Un exemple est particulièrement pertinent dans le contexte du présent rapport. Avant la destruction des principales usines de production d'armes biologiques d'Al Hakam et d'Al Manal[39], les équipes de la Commission spéciale avaient prélevé 350 échantillons du matériel, des sols, des réseaux d'assainissement et de l'environnement entourant ces installations. Ces échantillons ont été analysés dans des laboratoires de référence de trois pays, notamment le Naval Medical Research Institute (NMRI) de Bethesda, Maryland (États-Unis). Les chercheurs du NMRI ont utilisé toute une batterie de méthodes perfectionnées (décrites en détail ci-après), notamment le dosage immunologique et la réaction en chaîne à la polymérase (PCR), pour détecter la présence de deux agents de la guerre biologique, la toxine botulique et un agent pathogène, le *Bacillus anthracis* dans 15 échantillons. Un résultat positif s'est avéré important car il a permis de révéler que les Iraquiens fabriquaient un agent biologique de guerre précis dans une usine où ils niaient que de telles activités avaient jamais eu lieu.

117. La Commission spéciale est la première entité de maîtrise internationale des armements à avoir opéré sur le terrain pour déceler les agents biologiques et chimiques soumis à certaines règles. On peut raisonnablement supposer que son expérience sera d'une grande valeur pour ceux qui seront chargés, à l'avenir, de faire respecter les règles établies dans le cadre des accords internationaux de maîtrise des armements. Tout d'abord, cette expérience bénéficiera à l'Organisation pour l'interdiction des armes chimiques qui supervise la Convention sur les armes chimiques de 1997[40]. Les inspecteurs chargés du régime d'application, en cours de négociations, de la Convention de 1972 sur les armes biologiques ou à toxines[41] tireront également profit de l'expérience de la Commission spéciale.

Inventaire des techniques de pointe de la biotechnologie

118. Au cours des années 80 et 90, un certain nombre de nouvelles techniques applicables à la recherche-développement, aux essais et à la production a été mis au point. Mais nous nous limiterons ici à celles qui nont pas été examinées dans le rapport du Secrétaire général de 1990 et qui semblent particulièrement prometteuses pour la biodéfense et la maîtrise des armements. Ces techniques se regroupent en trois catégories : les biocapteurs, l'analyse d'acide nucléique et la spectrométrie de masse.

Les biocapteurs

119. En général, on procède aux mesures en utilisant des capteurs. Dans le traitement classique par voie biologique, les capteurs sont toujours des instruments d'analyse qui

peuvent être aussi simples que des indicateurs de température ou des pH-mètres, et aussi complexes que le dosage radio-immunologique et la chromatographie en phase gazeuse. Mais nous nous intéresserons ici à un type particulier de capteur, le biocapteur.

120. Tous les biocapteurs sont constitués de deux composants : une substance biologique immobilisée – enzyme, anticorps ou cellule complète – reliée à un transducteur ou à un élément générateur de signaux. Quand la substance biologique immobilisée réagit avec un objet d'analyse, ou s'y attache, ce phénomène est transmis au transducteur. Ce dispositif a pour fonction de transformer l'information envoyée par la substance biologique en signal (par exemple courant électrique, chaleur ou lumière). Le matériel informatique mesure la réaction en quantifiant le signal et en fournissant les résultats à l'opérateur en quelques secondes ou en quelques minutes selon la nature des données reçues.

121. Deux types précis de biocapteurs valent la peine d'être décrits. Le premier est le biocapteur électrochimique. Dans cette configuration, les molécules de détection, dans la plupart des cas des enzymes, sont immobilisées sur la pointe de la sonde ou tenues en place par une membrane. Les molécules de détection réagissent avec les substances dont la présence est testée, générant un signal électrique proportionnel aux concentrations détectées. Le capteur peut être conçu en fonction des molécules de détection afin de réagir à toute une gamme de réactifs, d'un agent chimique particulier à des catégories entières de composés.

122. Le second est le capteur immunologique. Il est constitué de deux composants : un anticorps et l'élément de reconnaissance moléculaire. L'anticorps est capable de se lier de manière sélective à des antigènes qui peuvent, en théorie, être n'importe laquelle de toute une série de substances, notamment des biomolécules, des drogues, des bactéries, des virus et des matières cellulaires. Le signal observé reflète l'interaction anticorps-antigène de manière quantitative.

123. Pour terminer le tableau, il serait bon de décrire brièvement trois autres types de biocapteurs. Ils ne semblent pas être d'une application immédiate à la biosécurité et à la maîtrise des armements, mais cela pourrait changer à l'avenir. Le premier est le capteur optique, qui réagit au comportement de la lumière quand elle traverse la solution du test, enregistrant des phénomènes tels que l'absorption, la fluorescence ou la diffusion de la lumière, ou la spectrophotométrie. Le recours à des fréquences différentes permet de déceler de multiples objets d'analyse. Les capteurs optiques sont particulièrement utiles dans le domaine de la biologie médicale. Le deuxième type est le biocapteur piézoélectrique. Dans ce dispositif, les molécules de détection réagissent à l'objet d'analyse en émettant des vibrations mécaniques qui se transforment ensuite en signaux électriques proportionnels à l'importance de l'objet d'analyse. Le troisième type est le chimiorécepteur. Ce biocapteur est en fait un assemblage biomoléculaire qui influe sur les fonctions physiologiques telles que l'odorat et le goût, et sur les voies biochimiques neurales et métaboliques. Les biocapteurs qui utilisent des structures intactes de chimiorécepteur qui proviennent de sources naturelles telles que les crustacés et les poissons se sont avérés capables de réactions quantitatives aux acides aminés, aux hormones, aux nucléotides, aux drogues et aux toxines.

124. Le grand avantage des biocapteurs sur les capteurs conventionnels est qu'ils produisent des résultats plus rapidement, peuvent être plus sensibles et sont plus sélectifs. En matière de contrôle des procédés biologiques industriels, par exemple, les biocapteurs permettent aux techniciens et aux ingénieurs de suivre des réactions complexes en temps réel et, si nécessaire, d'ajuster les taux de réaction pour atteindre un niveau maximal de production. Dans l'environnement, on peut se servir des biocapteurs pour détecter la présence de polluants dans l'air, le sol et l'eau, et pour suivre leur propagation à partir des lieux d'émission, notamment les usines, les entreprises agricoles, les usines d'évacuation des déchets, etc. Les progrès techniques entraîneront le développement de biocapteurs bon marché qui seront peut-être même jetables après un seul usage.

125. Mais les biocapteurs présentent également des inconvénients et peuvent s'avérer coûteux. Au point actuel de leur développement, il est nécessaire que ce soient des techniciens de très haut niveau qui les emploient, en particulier sur le terrain. Les biocapteurs peuvent facilement être «empoisonnés» : certains agents chimiques présents dans l'environnement peuvent endommager ou détruire l'élément de détection. Certains types de biocapteurs, qui sont parfois onéreux, ne peuvent pas servir plusieurs fois : une fois que le capteur a détecté une substance cible, il se produit une réaction chimique unique et le capteur utilisé doit être remplacé.

Analyse d'acide nucléique

126. Toute forme de vie possède parmi ses caractéristiques génétiques des séquences qui lui sont propres et donc, en théorie, il est possible de déterminer l'origine de n'importe quelle séquence génétique. Si, par exemple, les inspecteurs de la Commission spéciale recueillent des échantillons dans des fermenteurs et des dessicateurs qui contiennent du matériel génétique, une bonne analyse permettra, en principe, d'identifier l'organisme d'origine.

127. Mais dans la pratique, des difficultés se font souvent

jour. Deux problèmes en particulier reviennent fréquemment. Premièrement, il se peut que la quantité de matériel génétique trouvée dans un échantillon soit infime. Étant donné que les méthodes normalisées qu'utilisent les laboratoires de référence nécessitent habituellement des quantités d'objet d'analyse supérieures à des milligrammes, voire à des grammes, il est impossible d'analyser des quantités inférieures de façon concluante. Deuxièmement, la plupart des micro-organismes que l'on trouve dans la nature n'ont été ni identifiés ni classés. Même le plus petit échantillon de sol contient des milliards de micro-organismes dont les microbiologistes ont caractérisé moins de 5 %. Il s'ensuit que la plus grande partie du matériel génétique prélevé dans les échantillons d'environnement et autres n'est pas connue, et que les analystes auront des difficultés à en déterminer l'origine.

128. On peut recourir à trois techniques modernes de la biotechnologie pour passer outre aux difficultés liées à l'analyse des échantillons, en particulier les échantillons prélevés dans l'environnement : amplification en chaîne par polymérase, polymorphisme de longueur des fragments de restriction (RFLP), et ribotypage.

129. La réaction en chaîne de la polymérase (PCR) est une méthode d'amplification du matériel génétique que l'on trouve dans un échantillon : une seule copie d'une séquence d'ADN peut être reproduite des millions de fois. Un certain nombre de techniques de PCR ont été mises au point[42] mais elles fonctionnent toutes selon le même principe. L'analyste commence la PCR en ajoutant à l'échantillon une paire de séquences d'ADN synthétiques courtes, appelées amorces, qui se lient à des séquences connues de part et d'autre de l'ADN qui doit être amplifiée. Au cours de la réaction qui suit, il se forme une copie de la séquence en question. La réaction se répète jusqu'à ce que le nombre de copies soit suffisant pour permettre une analyse à l'aide des techniques normalisées. En général, les produits amplifiés sont séparés par électrophorèse, les produits séparés sont séquencés, et les séquences qui en résultent sont alors comparées aux séquences connues stockées dans une banque de données.

130. Alors que seul l'ADN peut être soumis à une analyse de la PCR, l'ARN dans les génomes viraux de l'ARN peut également être amplifié à condition de modifier la technique en usage. Si un analyste pense qu'il y a de l'ARN dans un échantillon, la première chose à faire est de le traiter à l'enzyme transcriptase inverse qui produit une copie d'ADN de l'ARN. La copie d'ADN peut être alors amplifiée à l'aide de la PCR

131. Lorsque l'on procède à un RFLP, on ajoute à l'échantillon certaines enzymes qui divisent les séquences d'ADN, et le mélange réactionnel qui en résulte subit une électrophorèse dont l'objectif est de séparer les fragments de tailles différentes. Le schéma des fragments, qui est unique à chaque type d'organisme, est communément appelé «empreinte digitale» de l'objet d'analyse, ou de manière plus exacte empreinte ou profil génétique. Le schéma produit par l'objet d'analyse est alors comparé aux schémas connus stockés dans une base de données. Le RFLP permet de procéder à une analyse rapide quand l'analyste a une idée relativement précise des agents qui pourraient se trouver dans un échantillon.

132. Il existe une variante du RFLP : le ribotypage. Le ribotypage commence quand l'analyste détruit (dissout) les cellules qui sont dans l'échantillon, puis coupe l'ADN lâché par les cellules dissoutes dans les fragments dotés d'une enzyme de restriction. L'analyste utilise alors une électrophorèse sur gel pour séparer les fragments selon leur poids moléculaire. Ensuite, les fragments sont hybridés avec une sonde d'ADN et additionnés d'un agent à chimiluminescence. Un appareil photo digital en prend des images phosphorescentes, lesquelles sont ensuite traitées par une série d'algorithmes pondérés en fonction des marqueurs de poids moléculaires connus.

133. Il existe déjà sur le marché un instrument expérimental qui utilise le ribotypage. Le «Riboprinter», mis au point par Qualicon à Wilmington, Delaware (États-Unis) est utilisé dans l'agriculture pour détecter et identifier les bactéries pathogènes qui s'attaquent aux animaux. L'ordinateur du système est doté d'un logiciel qui lui permet de comparer rapidement les schémas d'organismes inconnus à ceux des organismes connus stockés dans la base de données. La découverte d'un schéma complémentaire indique qu'une identification a été faite. Les résultats sont immédiatement imprimés et stockés dans la base de données pour référence. Pour la plupart des types de bactéries, l'analyse peut être terminée en huit heures[43].

134. Les techniques d'analyse d'acide nucléique, sensibles et précises, permettent d'identifier avec grande précision de très petites quantités d'ADN se trouvant dans des spécimens environnementaux ou cliniques. Ces méthodes sont cependant difficiles à mettre en pratique et, les tests devant se faire avec prudence, il faut faire appel à des techniciens et à des scientifiques hautement qualifiés. En outre, il faut utiliser des réactifs biochimiques purs et onéreux afin d'obtenir des réactions, ainsi que du matériel ultraperfectionné pour procéder aux analyses. Cest pourquoi à l'heure actuelle, ces techniques ne peuvent s'utiliser qu'en laboratoire. Ce n'est que dans plusieurs années que l'on pourra procéder de façon routinière à l'analyse d'acide nucléique sur le terrain à l'aide de matériel portatif. Par ailleurs, bien que le nombre de séquences d'ADN enregistrées dans des bases de données soient en augmentation rapide, beaucoup d'autres doivent

encore être caractérisées avant qu'il soit possible de procéder à une détection et à une identification massives des micro-organismes présents dans l'environnement.

Spectrométrie de masse

135. La spectrométrie de masse est une technique classique bien établie utilisée par les chimistes et les physiciens pour caractériser de petites molécules. Quand un opérateur procède à une analyse en recourant à la spectrométrie de masse, il commence par fragmenter l'objet d'analyse en ions chargés électriquement qui ont chacun une masse caractéristique. Des ions en phase gazeuse sont injectés dans l'instrument et la distance qu'ils parcourent dans un champ électrique est mesurée (sinon, c'est le temps qu'ils mettent à se déplacer dans un champ électrique qui est mesuré). La distance que traverse un ion ou le temps qu'il met à se déplacer est proportionnel à sa masse. La signature de spectrométrie de masse du spécimen est constituée du schéma de distribution de ses ions constituants qui peut être comparé aux signatures connues de substances déterminées expérimentalement. On peut utiliser des ordinateurs pour faciliter la comparaison entre la signature de la substance inconnue et celles qui sont stockées dans les bases de données[44].

136. Le matériel de spectrométrie de masse a toujours été de taille considérable, massif et grand consommateur d'énergie. Mais la technologie connaît une rapide évolution. Trois types d'amélioration sont importants pour le présent rapport. Premièrement, ces dernières années, des méthodes ont été mises au point qui permettent de recourir à la spectrométrie de masse pour analyser de grosses molécules, notamment les protéines et l'ADN. Deuxièmement, il a beaucoup été fait pour miniaturiser le matériel de spectrométrie de masse; des dispositifs portatifs ont déjà été installés dans des jeeps et apportés sur le terrain pour y analyser l'échantillon. Troisièmement, des programmes informatiques sont en train d'être élaborés qui permettent aux analystes de beaucoup mieux interpréter les données générées par la spectrométrie de masse.

137. Une nouvelle technique qui permet de soumettre les grosses molécules à la spectrométrie de masse est la désorption et l'ionisation par laser à l'aide d'une matrice (MALDI). Pour appliquer cette technique, on dépose l'échantillon sur une matière organique appropriée, ce qui entraîne sa séparation en ions libérés (désorbés) de la matrice. Ces ions peuvent alors être injectés dans l'instrument décrit plus haut[45].

138. Comme pour les autres substances, la bonne identification des signatures produites par la spectrométrie de masse est cruciale. Vu que les échantillons où se trouvent des agents biologiques ou des toxines contiennent souvent des matières organiques extrinsèques, il est nécessaire d'éliminer toutes les signatures qui en résultent. Par ailleurs, étant donné que la composition chimique des agents biologiques et des toxines est souvent complexe, il en est de même de leurs signatures. C'est pourquoi il faut poursuivre les efforts de recherche-développement de programmes informatiques qui éliminent les bruits de fond et produisent des schémas reconnaissables à partir des échantillons qui contiennent des protéines soumis à une spectrométrie de masse. À cette fin, il faudra également réunir une importante base de données de signatures de bactéries, de virus et de toxines déjà identifiés.

Conclusion

139. Les responsables de la biosécurité et de la maîtrise des armements doivent être disposés à adopter des biotechniques avancées, même si ces méthodes ne sont pas facilement applicables aujourd'hui. La biotechnologie moderne connaît des progrès rapides. Les techniques actuelles de recherche en laboratoire seront bientôt utilisables pour des travaux sur le terrain. Ces méthodes de détection renforceront l'aptitude des gouvernements à protéger leurs populations des menaces biologiques et amélioreront la crédibilité et l'efficacité des efforts internationaux de maîtrise des armements de la guerre biologique.

140. Si les autorités de la défense civile qui cherchent à protéger les populations de la menace d'une guerre biologique étaient à même de déployer des capteurs capables de déceler en temps réel des agents pathogènes et des toxines, elles pourraient mettre en place un excellent système de protection. Il faudrait associer à cela une préparation dans le domaine de la santé publique, notamment par exemple, la mise en place d'un réseau de communications et le stockage de drogues thérapeutiques et de matériel de décontamination. Côté militaire, les soldats déployés au front et à l'arrière seraient mieux préparés à se défendre contre des armes biologiques s'ils étaient personnellement équipés de biocapteurs qui donneraient immédiatement l'alarme si des agents pathogènes ou des toxines vaporisés étaient décelés à proximité.

141. Malheureusement, les biocapteurs actuels ne sont capables de détecter qu'un très petit nombre d'agents pathogènes ou de toxines, et ils ne fonctionnent pas en temps réel. De manière générale, les plans d'urgence prévus en cas de catastrophe biologique font tristement défaut à tous les niveaux de gouvernement dans la plupart des pays. Il n'est pas exagéré de dire que la plupart des nations sont insuffisamment préparées face aux menaces biologiques, qu'elles proviennent de la nature ou du laboratoire.

142. Comme il est actuellement impossible d'arriver à une

détection préalable, on saura, dans un premier temps, qu'on se trouve en présence d'une catastrophe biologique quand les urgences hospitalières et les postes militaires d'assistance verront soudain déferler un grand nombre de malades. Le personnel médical civil et militaire serait alors confronté à une crise à laquelle il est loin d'être préparé, et le nombre des victimes serait élevé. Si, par exemple, l'agent utilisé était le *Bacillus anthracis*, agent étiologique de l'anthrax, toute personne exposée devrait prendre des antibiotiques dans les heures qui suivent l'apparition des premiers symptômes, sans quoi le taux de mortalité dépasserait les 60 %[46]. Pour bien soigner les malades, il faudrait que le personnel sanitaire ait les moyens d'identifier au plus vite l'agent de la maladie et qu'il dispose d'une quantité suffisante d'antibiotiques.

143. Les méthodes qu'utilisent actuellement les laboratoires de microbiologie clinique ne produisent pas de résultats rapides. La culture et l'identification des bactéries prennent au moins 24 heures; il faut parfois plus de trois semaines pour identifier un virus, et six semaines ou plus dans le cas d'une toxine. Il est clair qu'en matière de santé publique, il faudrait mettre au point des technologies qui puissent rapidement détecter et identifier les agents pathogènes et les toxines.

144. Ces dernières années, de nouvelles techniques de détection et d'identification ont été en phase de développement et elles devraient bientôt se concrétiser. Deux d'entre elles sont particulièrement prometteuses : une spectrométrie de masse perfectionnée et des applications en réseau.

145. Bien que la méthodologie traditionnelle de la spectrométrie de masse souffre de plusieurs inconvénients importants qui en restreignent l'utilité technique sur le terrain, les progrès mentionnés plus haut pourraient bientôt triompher de ces handicaps. De nouvelles techniques ont été mises au point qui permettent d'analyser les bactéries et les toxines à l'aide de la spectrométrie de masse; l'instrumentation et le matériel de spectrométrie de masse sont miniaturisés et deviennent assez solides pour supporter les conditions sur le terrain; et on s'attache à analyser les agents pathogènes et les toxines connus grâce à la spectrométrie de masse, à en inscrire les signatures dans des bases de données et à développer un logiciel qui identifiera les signatures en dépit d'un environnement "bruité". Ces progrès sont convergents. D'ici cinq ans, il existera un appareil mobile de spectrométrie de masse capable d'analyser du matériel de guerre biologique et qui sera connecté à distance aux bases de données afin de pouvoir comparer immédiatement les signatures des agents recueillies sur le terrain aux signatures connues et stockées. Les analystes pourront préparer et analyser les échantillons environnementaux et cliniques en moins de 30 minutes, et procéder à une identification définitive des agents pathogènes ou des toxines étiologiques en moins d'une heure.

146. À l'heure actuelle, les responsables de la santé publique et le personnel médical qui prennent des dispositions face à une catastrophe biologique ne savent pas quels agents sont responsables de l'épidémie. C'est pourquoi l'aptitude à identifier un grand nombre d'agents pathogènes et de toxines rapidement au cours d'un seul titrage serait extrêmement utile. Une technique prometteuse consiste à utiliser une combinaison de biocapteurs, tels des anticorps, en microformats, telles des microplaquettes[47]. Un très grand nombre d'anticorps peut être immobilisé sur la surface des microplaquettes qui peuvent être immergées dans une solution contenant l'objet d'analyse. Quand un anticorps se lie à un antigène, cela génère un signal qui est communiqué visuellement à l'opérateur. Étant donné que les réactions anticorps-antigènes sont très spécifiques, cette liaison permettra d'identifier l'antigène avec précision. Bien qu'il existe déjà des trousses contenant des combinaisons, il faut encore résoudre les problèmes relatifs à la préparation des échantillons avant qu'ils puissent être utilisés en toute confiance sur le terrain. Mais ce problème ne devrait plus exister d'ici cinq ans.

147. Alors que dans une situation critique, une attaque biologique par exemple, la détection et l'identification immédiates de l'agent causal sont des plus prioritaires, dans le domaine de la maîtrise des armements, la sécurité des échantillons recueillis et l'exactitude de leur analyse sont les considérations les plus importantes. La sécurité des échantillons durant le transport et le stockage doit être garantie, sinon leur valeur en tant que preuve s'en trouve réduite ou annulée. Il en va de même pour la précision de l'analyse; si les personnes qui jugent les cas de non-respect (du règlement) ne peuvent pas être assurées de l'exactitude et de la précision de l'analyse des échantillons, les résultats ne sont pas recevables en tant que preuve.

148. Face à ce problème, une solution possible consiste à tester les échantillons là où ils sont recueillis. Cela permettrait d'apaiser une préoccupation : comment préserver les informations confidentielles qui se trouveraient dans les échantillons au moment de l'inspection des installations? Si les inspecteurs qui veillent au régime d'application de la Convention sur les armes chimiques et, à l'avenir, ceux qui travailleront également à faire appliquer la Convention sur les armes biologiques devaient analyser des échantillons *in situ*, cela réduirait le problème. Mais pour effectuer des tests sur place, les inspecteurs devraient fournir le matériel, les réactifs et les fournitures nécessaires. Et de quel matériel auront-ils besoin pour mener à bien ces tests *in situ*?

149. L'expérience de la Commission spéciale, qui inclut la collecte et l'analyse de centaines de spécimens prélevés dans les installations, nous indique que s'il y a une matière suspecte dans un échantillon, elle s'y trouve en quantités infinité-

simales. Il est donc important pour les inspecteurs qu'ils puissent procéder à la réaction en chaîne de la polymérase (PCR) afin d'amplifier les minuscules segments d'ADN. Une fois cette opération terminée, le produit pourrait être analysé à l'aide des procédures standard d'immunoessai. Mais, comme on l'a vu plus haut, dans quelques années, l'arsenal des techniques d'analyse dont disposeront les inspecteurs sera passablement renforcé grâce à l'efficacité des instruments portatifs de spectrométrie de masse. Il n'est pas exagéré de penser qu'au moment où le régime d'application de la Convention sur les armes biologiques sera mis en place, les inspecteurs pourront utiliser nombre de ces techniques sur le terrain.

150. En conclusion, au cours de la dernière décennie, la communauté internationale a accompli des progrès considérables en matière de contrôle de la prolifération des armes nucléaires, notamment avec la prorogation du Traité sur la non-prolifération nucléaire et la mise au point du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (qui n'est pas encore en vigueur). Une nation ou une organisation terroristes qui seraient incapables de se procurer des armes nucléaires pourraient opter pour des armes de destruction massive, tout particulièrement des armes chimiques ou biologiques. Cependant, l'acquisition d'armes chimiques nécessite aussi des procédés techniquement perfectionnés et onéreux (même s'ils le sont moins que pour les armes nucléaires) et entraîne la construction d'installations spécialisées que les dispositifs techniques nationaux peuvent détecter relativement facilement. En plus de cela, la plupart des produits chimiques précurseurs nécessaires à la production des agents des armes chimiques sont suffisamment peu communs pour que leur importation/exportation, surtout s'il s'agit de quantités importantes, puisse être détectée et surveillée par les Services nationaux de renseignements et le Secrétariat technique de l'Organisation pour l'interdiction des armes chimiques qui fonctionne sous l'égide de la Convention sur les armes chimiques. Les dirigeants agressifs de nations ou de groupes subnationaux ayant probablement des difficultés à se procurer des armes nucléaires ou chimiques, certains pourraient tenter d'acquérir des armes biologiques. Comme on l'a vu dans cette section, les techniques de la biologie moléculaire peuvent s'avérer utiles pour s'assurer du respect des régimes internationaux, pour détecter le développement illicite des agents de la guerre biologique et, si possible, pour déterminer rapidement l'étiologie d'épidémies. Du fait de la rapidité des progrès de la biotechnologie en général, les techniques de la biologie moléculaire vont sans doute être de plus en plus utilisées par les gouvernements et les institutions internationales qui cherchent à protéger les populations de la planète des maladies, et à dissuader la prolifération des armes biologiques.

151. Il ne faut pas oublier que les techniques ultraperfectionnées de la biologie moléculaire peuvent être appliquées à bien d'autres domaines que celui de la maîtrise des armements. La recherche en biologie moléculaire a suscité des découvertes qu'appliquent les pays développés et les pays en voie de développement pour améliorer la production agricole et l'élevage, pour augmenter la production industrielle en recourant à des techniques essentiellement non polluantes, pour remédier à la pollution des milieux marins et terrestres, pour mettre au point de nouveaux produits pharmaceutiques qui n'auraient jamais été inventés s'il n'existait que des techniques chimiques conventionnelles, et pour de très nombreuses applications. Ainsi donc, il faut bien savoir que le clonage moléculaire de gènes, le transfert de gènes, la manipulation génétique d'embryons d'animaux et de graines végétales, le transfert d'embryons, la manipulation génétique des micro-organismes du rumen, la construction de cellules génétiquement modifiées, comme les anticorps monoclonaux, pour procéder à des immunodiagnostics et à des immunoprophylaxies, ainsi que le développement de sondes génétiques sont autant de techniques qui sont appliquées, et le seront de plus en plus, à des activités de recherche-développement et de production ayant des fins pacifiques, qui bénéficieront à tous les peuples du monde. Il est donc très important que les États parties à la Convention sur les armes biologiques s'attachent à mettre en oeuvre l'article X qui demande aux nations ayant souscrit au Traité de coopérer avec la communauté internationale afin d'appliquer la microbiologie à des fins pacifiques. Malheureusement, les États parties ont, jusqu'à présent, négligé de mettre l'article X en application, car ils ne sont sans doute pas disposés à fournir les fonds nécessaires. Pour lever cet obstacle, peut-être faudrait-il énoncer clairement que, si une collaboration s'instaurait en vue de mener des recherches à des fins pacifiques, comme le stipule l'article X, cela empêcherait les chercheurs qui seraient tentés de le faire de se livrer à des recherches lucratives et illégales axées sur la production d'armes.

Notes

[1] Faga, Martin (First Secretary of the Air Force for Space and Director of the National Reconnaissance Office), «Prepared remarks to the National Space Club», 29 novembre 1989, p. 2.

[2] Scott, W. B., «Army, Navy space resources focus on tactical support», *Aviation Week and Space Technology*, 1er septembre 1997, vol. 147, No 9, p. 56 et 57.

[3] Presidential directive on GPS, *Office of Science and Technology Policy*, National Security Council, 29 mars 1996, Washington, D. C.

[4] Gilbert, C., «The end of Selective Availability: a signal difference, or just a different signal?», *Mapping Awareness*, vol. 10, No 6, juillet 1996, p. 30 à 32.

[5] Klass, P. J., «New GPS policy attempts to resolve key user issues», *Aviation Week and Space Technology*, vol. 146, No 24, 9 juin 1997, p. 42 et 43.

[6] Dornheim, M., «Milstar 2 brings new program role», *Aviation Week and Space Technology*, 16 novembre 1992, p. 93.

[7] McCanley, J. F., *et al.*, «Surface valley and geoarcheology of the Eastern Sahara revealed by Shuttle radar», *Science*, vol. 218, No 4576, 3 décembre 1982, p. 104 à 129.

[8] Covault, C., «NRO radar, SIGINT launches readied», *Aviation Week and Space Technology*, vol. 147, No 9, 1er septembre 1997, p. 22 à 24; et «Secret relay, Lacrosse NRO spacecraft revealed», *Aviation Week and Space Technology*, vol. 148, No 12, 23 mars 1998, p. 26 à 28.

[9] Ibid.

[10] Cushman, J., «AF seeks invulnerable warning satellites», *Defense Week*, 16 janvier 1984, p. 12.

[11] Pike, J., Lang, S. and Stambler, E., «Military use of space», *SIPRI Yearbook 1992, World Armaments and Disarmament*, 1992 (Oxford University Press/Institut international de recherches pour la paix de Stockholm, 1992), p. 121 à 146.

[12] Richelson, J., *The U.S. Intelligence Community* (Ballinger, Cambridge, Mass., 1985), p. 140 à 143.

[13] Keirman, V., «DMSP satellite launched to aid troops in Middle East», *Space News*, 10 décembre 1990, p. 6.

[14] «Sluggers pinch hit Army GPS», *Military Space*, 24 septembre 1990, p. 1 à 8.

[15] «Last FLTSATCOM satellite planned for launch September 22», *Aerospace Daily*, 15 septembre 1989, p. 466.

[16] «Satcom gears up for Desert Shield», *Military Space*, 24 septembre 1990, p. 3 à 5.

[17] Kierman, V., «Satellite data boosts map quality for US troops», *Space News*, 15 octobre 1990, p. 1 et 20.

[18] Ferster, W., «U.S. Space priorities unveiled», *Space News*, 13-19 avril 1998, vol. 9, No 15, p. 3 et 20.

[19] «U.S. Air Force launches laser design competition», *Space News*, 9-15 mars 1998, vol. 9, No 10, p. 17; et Ferster, W., «Partners TRW, Lockheed Battle for test laser», *Space News*, 20-26 avril 1998, vol. 9, No 15, p. 8.

[20] Zalgo, S. J., «Re Star Wars», *Jane's Intelligence Review*, mai 1997, vol. 9, No 5, p. 205 à 208.

[21] Gertz, W., «Yeltsin letter reveals anti-satellite weapons», *The Washington Times*, 7 octobre 1997.

[22] Fulghum, D. A., «Airborne laser tested, weighed for new missions», *Aviation Week and Space Technology*, 27 octobre 1997, vol. 147, No 17, p. 26.

[23] *Aviation Week and Space Technology*, 2 mars 1997, vol. 148, No 8, p. 21.

[24] Jasani, B. et Mara, S., «The Western European Union Satellite Centre», *Journal of the British Interplanetary Society*, juin 1993, vol. 46, No 6, p. 209 à 211.

[25] *Peaceful and non-peaceful uses of space – Problems of definition for the prevention of an arms race*, Jasani, B. (éd.), 1991 (UNIDIR, Genève, et Taylor et Francis, Londres, 1991).

[26] Réunion d'experts de haut niveau sur les aspects sociaux des nouvelles technologies (1988), Paris.

[27] Wriston, W. (1997), Bits, bytes and diplomacy, *Foreign Affairs*, vol. 76 No 5, p. 172 à 181.

[28] Dipert, B. (1997), «Trends toward faster, bigger, lower power designs emerge at ISSCC», *Electrical Design News*, vol. 42, No 6, p. 16 à 18.

[29] Nua Internet Surveys (1998) : http://www.nua.ie/surveys/how_many_online/index.html.

[30] Ghiariglione, L. (1977), Numéro spécial de *Image Communication* sur MPEG-4, *Image Communication*, vol. 9, No 4, p. 295 à 304.

[31] Lamarre L. (1998), «The digital revolution», *Electronic Power Research Institute Journal*, vol. 23, No 1, p. 26 à 35.

[32] Munro, N. (1996), «Sketching a national information warfare defense plan», *Communications of the Association for Computing Machinery*, vol. 39, No 11, p. 15 à 18. Fraumann, E. (1997) «Economic espionage: security missions redefined», *Public administration review*, vol. 57, No 4, p. 303 à 309.

[33] Grabosky et Smith (1996), «Fraud: an overview of current and emerging risks», *Trends and Issues in Crime and Criminal justice* (Australian Institute of Criminology, novembre, Canberra).

[34] Farish, M. (1997), «Evolving solutions», *Engineering*, vol. 238, No 10, p. 62 à 64.

[35] Fitzgerald, B. (1996), «Formalized systems development methodologies: a critical perspective», *Information systems Journal*, vol. 6, p. 3 à 23.

[36] OCDE (1997), «*Distant Selling in a Global Marketplace: Codes of Conduct*», DAFFE/CP[97]8, Paris.

[37] Zilinskas, R. A. (éd.) (1998) *Biological Warfare and Defense in the Era of Molecular Biology*, Boulder (Colorado); Lynne Rienner Publishers) (sous presse).

[38] Zilinskas, R. A. (ed.) (1995). Symposium of United Nations Biological Weapons Inspectors: Implications of the Iraqi Experience for Biological Arms Control. *Politics and the*

Life Sciences, vol. 14, p. 229 à 262.

[39] Zilinskas, R. A. (1997). Iraqs biological weapons: The past as future? *Journal of the American Medical Association*, vol. 278, p. 418 à 424.

[40] Tucker, J. B. (1998), «Verification provisions of the Chemical Weapons Convention and their relevance to the Biological Weapons Convention», in: Chevrier, M. I., Pearson, G. S. Smithson, A. E., Tucker, J. B. et Woollett, G. R. (éd..) *Biological weapons proliferation: reasons for concern, courses of action*, Rapport No 24, p. 77 à 105, (Washington, Henry L. Stimson Center).

[41] Chevrier, M. I. (1998). «Doubts about confidence: the potential and limits of confidence building measures for the Biological Weapons Convention, in: Chevrier, M. I., Pearson, G.S., Smithson, A.E., Tucker, J.B. et Woollett, G.R., (éd.) *Biological weapons proliferation: reasons for concern, courses of action*, Rapport No 24, p. 53 à 75 (Washington, Henry L. Stimson Center).

[42] Innis, M. A., D. H. Gelfand, et J.J. Sninsky (éd.) (1995), *PCR Strategies* (San Diego, Californie: Academic Press).

[43] LaBudde, Robert A. Genetic typing, microbial food contaminants – E.U. *Food Quality*, avril 1998. 12 mai 1998. (electronic citation).

[44] Morse, S. S. (1998). «Methods for detecting biological warfare (BW) agents», in : Zilinskas, R. A. (ed.) *Biological warfare and defense in the era of molecular biology* (Boulder (Colorado), Lynne Rienner Publications) (sous presse).

[45] Claydon, M. A., Davey, S. N., Edward-Jones, V. et Gordon, D. B. (1996). «The rapid identification of intact microorganisms using mass spectrometry», *Nature Biotechnology*, vol. 14, p. 1584 à 1586.

[46] Friedlander, A. M. (1997), «Anthrax», in : Sidell, F. R., Takafuji, E. T. et Franz, D. R. (eds.), *Medical aspects of chemical and biological warfare*, p. 467 à 478 (Washington, Bureau du Chef des services de santé).

[47] Abramowitz, S. (1996). «Towards inexpensive DNA diagnostics, *Trends in biotechnology*, vol. 14, p. 397 à 401.