

Société de Calcul Mathématique, S. A.
Algorithmes et Optimisation



**Les exportations de matériel sensible
et la prolifération :**

*Essai de définition d'une méthodologie générale
et application à l'observation par satellite*

**Rapport remis à la
Délégation aux Affaires Stratégiques
Ministère de la Défense**

par la

Société de Calcul Mathématique SA

décembre 2002

en application de la commande 2001/038.T, du 5 juin 2002

Résumé Opérationnel

Les règles présidant à l'exportation de matériels sensibles deviennent délicates à mettre en œuvre, du fait de l'apparition de technologies duales, souvent en avance sur les technologies de défense, et du fait aussi de nécessités commerciales : les acheteurs ne se contentent plus de matériel tout fait, ils veulent être formés et comprendre le fonctionnement du système qu'ils achètent. Se pose alors le problème de l'accès à la science fondamentale : que pouvons-nous exporter ?

La méthode MMO, que nous présentons ici, répond à ces interrogations :

Miniaturisation : nous pouvons laisser accès à toute la science académique, mais les algorithmes opérationnels doivent être miniaturisés, protégés, présentés sous forme de « boîte noire », à laquelle l'utilisateur n'aura pas accès. Le système global est ainsi constitué de multiples modules miniaturisés.

Maintenance : le fabricant ou le constructeur doit opérer, à intervalles réguliers, une maintenance contractuelle. Cette maintenance permet de vérifier que le système n'a pas été détourné, et qu'il fait bien ce qu'il est censé faire.

Obsolescence : le fabricant remplace périodiquement des modules par d'autres plus performants. Les tentatives que des pays ou des industriels « suiveurs » peuvent lancer sont ainsi vouées à l'échec : le temps qu'ils comprennent le contenu d'un module, il a déjà été remplacé.

La méthode MMO doit intervenir au titre même de l'autorisation d'exportation : l'industriel doit s'engager à l'appliquer pour que l'autorisation lui soit accordée. Elle bénéficie à l'Etat, qui sait encore, plusieurs années après, où sont les systèmes dont il a autorisé l'exportation. Elle bénéficie à l'industriel, qui dispose d'un marché captif.

La méthode MMO est en fait une *méthode de gestion des gaps technologiques*. Elle répond en particulier à la question, qui revient très fréquemment : devons-nous laisser l'accès libre à notre science fondamentale ? Que devons-nous protéger ?

On voit que ce qui compte ici, ce n'est pas l'abondance de recherche académique, dont une très faible partie parviendra à maturation. Il n'y a aucun inconvénient à laisser quiconque suivre de tels cours, bien au contraire. Mais il ne faut pas révéler quelles sont, parmi toutes les solutions envisagées, celles qui donnent lieu à un développement opérationnel. Ce sont les modules miniaturisés qui doivent être protégés, et non pas la science fondamentale qui a permis leur élaboration.

La méthode MMO s'applique très bien aux systèmes d'observation par satellite, que nous prenons comme exemple de mise en œuvre. La miniaturisation va de soi pour la partie embarquée ; pour le « segment sol », il faut protéger les algorithmes opérationnels de traitement de l'image. Il y a une très forte « pression commerciale » autour des satellites d'observation ; dans une large mesure, ils n'ont pas tenu leurs promesses et, de ce fait, les fabricants ont du mal à les vendre. Restreindre l'exportation rendrait la vente encore plus difficile. La méthode MMO indique ce qu'il faut protéger : en l'occurrence, les procédés effectifs de traitement de l'image, et non les tentatives académiques.

Le véritable danger, sur ce point précis, se trouve dans les délocalisations et sous-traitances, lorsqu'elles sont de haut niveau scientifique et technique. Il est dangereux de mettre à la portée d'un pays susceptible de nous concurrencer des technologies sous forme opérationnelle. On peut avoir l'impression d'une économie à court terme, mais c'est un suicide.

Sur le plan du succès commercial comme sur celui de l'efficacité de défense, la crédibilité des systèmes de haute technologie n'est pas acquise : ceci concerne en particulier les systèmes de satellites. Comme le dit E. Luttwak, on a tendance à parer la technologie de vertus qu'elle ne possède que sur le papier : dans la réalité, les satellites ne voient pas aussi bien qu'on le souhaiterait, les lasers ne sont pas aussi précis, et les interceptions pas aussi fiables. Ceci concerne en particulier le bouclier anti-missiles américain.

La meilleure stratégie à mettre en œuvre, contre un pays susceptible de développer un programme de missiles balistiques, reste la dissuasion nucléaire : nos avions comme nos sous-marins ont une portée suffisante. Cette dissuasion est peu coûteuse, puisque nous la possédons déjà : seul intervient le maintien en condition opérationnelle ; de plus, la prolifération nucléaire est très bien contrôlée.

Table des matières

Première Partie : Prolifération des matériels de guerre, prolifération scientifique et concurrence commerciale

I. Le système actuel de contrôle des exportations.....	7
II. La prolifération scientifique	10
III. La réponse : procéder par modules identifiés	11
IV. Quels systèmes sont concernés ?	12

Seconde Partie: Les trois mots -clé: Miniaturisation, Maintenance, Obsolescence

I. La miniaturisation	14
II. La maintenance.....	14
III. L'obsolescence	15

Troisième Partie: La mise en œuvre des procédures MMO

I. Description sur un exemple.....	18
II. Possibilités de fraude	19
III. Revoir la nomenclature du SGDN.....	19
IV. Ces procédures peuvent-elles nuire à nos exportations ?	20
V. Ces procédures ne renforcent-elles pas l'excès le rôle de l'Industriel, au détriment de celui de l'Etat ?.....	20
VI. Mise en œuvre.....	20

Quatrième Partie : La mise en œuvre sur un système spatial : l'observation par satellite

I. Composition du système.....	22
II. L'exportation d'un système d'imagerie satellitaire	23
III. Utilisations civiles et militaires d'un système d'observation par satellite.....	23
IV. Utilisations militaires : la concurrence des drones	24
V. Mais quelle utilisation militaire ?.....	24
VI. Le contrôle de l'utilisation du système.....	26
VII. Mythes et réalités des systèmes commerciaux d'observation par satellite.....	27
VIII. L'application de la méthode MMO aux technologies d'imagerie satellitaire.....	29
A. Miniaturisation.....	29
B. Maintenance	30
C. Obsolescence	30
IX. La sous-traitance scientifique et technique : le vrai danger.....	31

Cinquième partie : Analyses spécifiques relatives aux éléments scientifiques et technologiques

I. Trajectographie et positionnement	34
A. Bien connaître la position précise des satellites	35
B. Améliorer le calcul du positionnement du mobile.....	35
C. Améliorer globalement l'information de position du mobile.....	35
D. Quels sont les points à protéger ?.....	35

E. Un exemple : la cartographie.....	36
II. Orientation, guidage, navigation, rendez-vous en orbite.....	36
III. Précision de visée.....	37
IV. Crédibilité	38
A. Réseau de satellites-laser	38
B. Les missiles contre-missiles	39
Annexe : La dimension économique de l'espace militaire (documents Euroconsult)	41

Première Partie

Prolifération des matériels de guerre,

prolifération scientifique

et concurrence commerciale

I. Le système actuel de contrôle des exportations

Le système actuel de contrôle des exportations ne donne pas complètement satisfaction, aux dires des responsables étatiques aussi bien qu'industriels. Les principaux griefs, bien entendu contradictoires, sont :

- Le résultat est peu prévisible : tel satellite sera interdit à l'exportation, tandis que telle caméra sera autorisée. Pourtant, le satellite était globalement banal, tandis que la caméra représentait l'objet de haute technologie à l'intérieur ;
- Les services de l'Etat se plaignent de n'avoir pas accès à temps aux informations qui leur seraient nécessaires pour prendre une décision. Les Industriels changent les nomenclatures, et il est difficile de savoir précisément à quoi sert tel ou tel composant ;
- Le tableau des pays auxquels s'appliquent des restrictions d'exportation a besoin d'être revu constamment ; c'est particulièrement vrai à l'heure actuelle où les données géopolitiques ont complètement changé, et où il faut incorporer les préoccupations de terrorisme. Nous-même avons déjà réalisé en 98, à la demande du SGDN, une révision de ce tableau, pour les domaines qui nous avaient été confiés ;
- Les préoccupations liées au terrorisme conduisent à un renforcement et à une extension des préoccupations de contrôle. On ne se limite plus à des systèmes complets et de haute technologie, tel un avion, un navire, un sous-marin. On voudrait aussi savoir où sont les missiles anti-chars, où sont les lance roquettes, les mortiers, etc....

Le travail que nous venons d'achever pour le Service des Programmes Navals concernant la protection d'un navire de surface contre des armes frustes mais proliférantes (le "Bouclier Local") débute par un recensement assez exhaustif des armes susceptibles d'être utilisées par les terroristes contre un navire, avec une portée d'au moins 500 m. La prolifération est considérable, et pas seulement pour les armes en provenance de l'Union Soviétique.

- Enfin, et c'est probablement ce qui préoccupe le plus les responsables, nous sommes en présence d'un phénomène nouveau dans l'histoire de la Défense : l'apparition de "technologies duales", c'est à dire d'usage aussi bien civil que militaire. En réalité, dans bien des cas, la technologie civile est en avance sur la technologie militaire.

Extrayons un passage de notre récent rapport au SGDN :

Analyse critique de la directive CE 1334/2000

Cette directive, qui concerne en général les « biens à double usage » part systématiquement de l'hypothèse (non écrite, mais clairement présente) que la technologie militaire est plus raffinée, plus précise, plus exigeante, que la technologie civile. Par exemple, un appareil sera exempt de limitations à l'exportation s'il fonctionne dans une plage de température

« ordinaire » (mettons entre -10°C et 50°C), mais il deviendra sujet à autorisation s'il fonctionne par très basses ou très hautes températures.

Cette façon de voir les choses était justifiée jusque dans les années 70-80, mais, du fait de la réduction de l'effort de défense, elle est progressivement devenue inexacte depuis 1990 et elle est aujourd'hui radicalement fautive, en Europe, dans un très grand nombre de domaines. Citons les principaux :

- Les applications de l'informatique sont à 99 % des applications civiles, y compris pour les grands calculateurs. Le marché des calculateurs spécifiquement militaires n'existe plus (les constructeurs de machines massivement parallèles ont tous disparu). Les micro-processeurs les plus performants (Intel, AMD, etc.) sont tous orientés vers des applications civiles (bureautique, jeux, etc.). Il n'y a plus de micro-processeurs « durcis » pour des applications militaires (trop lents, trop coûteux, marché trop restreint).
- Les applications des télécommunications sont essentiellement civiles. Les technologies liées aux poses de câbles (fibre optique, etc.), aux satellites de télécommunications, et surtout au téléphone portable, sont portées par le marché civil. Les forces armées en bénéficient, mais faiblement, et ne sont pas à l'origine de nouvelles découvertes, ni de nouveaux marchés.
- L'utilisation de l'espace, qui a du mal à trouver sa place, est également civile : satellites d'observation de la terre, de communications, etc. La part prise par les satellites militaires est très faible.
- Enfin, des technologies en plein développement, comme l'acquisition et le traitement de l'image numérique, ont trouvé leur véritable essor auprès du marché grand public, tout comme les protocoles d'échanges d'informations, d'identification, d'authentification, etc. La protection de l'information par « tatouage » trouve son pendant « grand public », infiniment plus développé, sous forme de « protection des droits d'auteur ». Les jeux vidéo ont plus contribué à l'essor de l'informatique temps réel que les simulations technico-opérationnelles de la Défense.
- Bien entendu, l'informatique scientifique, les codes de calcul, sont aujourd'hui développés pour des besoins civils : automobiles, ailes d'avion, etc.

Tout ceci peut avoir été inventé pour des besoins de défense (comme c'est le cas de la cryptographie), mais à partir du jour où le marché grand public s'en est emparé, il a complètement accaparé à son profit les technologies concernées, les a façonnées, leur a donné son cadre juridique, et a complètement oublié la finalité militaire, qui, en général, n'a même pas réussi à suivre l'évolution.

Il ne faudrait pas croire que le marché civil soit moins exigeant que le marché de Défense : au contraire, il l'est beaucoup plus. Les technologies de Défense sont rarement validées ; il y a peu de retour d'expérience. A l'inverse, si un opérateur de télécoms a un réseau de mauvaise qualité, les clients partiront. Si un constructeur automobile ne manifeste pas la plus extrême vigilance quant à la qualité de ses freins, il s'expose à des procès. La pression sociale, aussi bien que la pression commerciale, obligent les constructeurs et fabricants grand public à des percées technologiques, sans équivalent dans le monde de la Défense.

Aux USA, les choses sont un peu différentes : le Département de la Défense a su conserver l'initiative technologique en ce qui concerne le système de positionnement par satellite GPS (dont les applications sont pourtant essentiellement civiles), ainsi que dans le domaine très particulier des lasers de grande puissance, grâce à l' « Initiative de Défense Stratégique ».

Nous ne pousserons pas plus loin la comparaison entre les degrés de développement spécifiques des technologies civiles et militaires : c'est un sujet très intéressant, mais qui ne correspond pas exactement à ce que nous demande le SGDN. Cependant, il était nécessaire d'aborder ce point de manière préalable, pour bien éclairer le cadre de l'étude en ce qui concerne la directive de la CE.

Cette directive, en effet, ignore l'évolution dont nous parlons ; elle est périmée avant d'avoir existé, puisqu'elle prend soin d'écrire que « sont exclus du champ d'application de la directive toutes les technologies grand public et toutes celles qui se rapportent à la science fondamentale ».

Certes, les technologies liées aux lasers de puissance à longue portée ou à la vision infra-rouge demeurent essentiellement liées à la défense, mais ne le sont plus les lasers de puissance à courte portée, ni l'optique dans le visible.

Il convient d'ailleurs d'être plus précis que nous ne l'avons été dans notre rapport au SGDN ; il faut en effet distinguer :

- les applications commerciales des technologies, qui demandent des matériels de plus en plus sophistiqués ;
- les besoins de la recherche fondamentale, par exemple en astrophysique, qui requièrent des appareils, certes coûteux et en petit nombre, mais encore plus sophistiqués.

Il faut noter que ces deux catégories (et pas seulement la première) échappent au contrôle imposé aux matériels sensibles.

Prenons un exemple concret pour la première catégorie : l'IGN commercialise des cartes au 25 000, sur CDROM, couvrant la totalité du territoire français. Longtemps, les cartes détaillées d'un pays ont été considérées comme relevant de la Défense. Mais cette protection a ici cédé le pas devant les nécessités commerciales : ces cartes sont en effet utiles pour les besoins de voirie, la collecte des déchets, etc....

Pour la seconde, reprenons un exemple cité par le Général Jean Guyaux dans son livre « L'espion des Sciences » (2002) : les appareils en astrophysique susceptibles de mesurer le décalage de la lumière vers le rouge, et donc la vitesse des galaxies (qui sert à estimer l'âge de l'Univers).

En bref, pour toutes ces raisons, on court le risque de voir un terroriste, formé dans nos Ecoles ou dans nos Universités, ayant un bon bagage scientifique (par exemple en électronique, aéronautique, etc.), bricolant le système de guidage d'un missile plus ou moins ancien pour le diriger vers une cible de son choix, dont les coordonnées sont aisément acquises grâce à une carte de l'IGN. La position de départ est facilement obtenue grâce au GPS, dont les récepteurs sont disponibles dans bien des grandes

surfaces. On peut ainsi prendre pour cible une installation quelconque, par exemple une centrale nucléaire, dans de bien meilleures conditions de sécurité et d'efficacité, comparées au placement d'une bombe à proximité de l'édifice. Si l'on tire de 5 km, on peut le faire en toute tranquillité, à partir d'un hangar spécialement aménagé ; tandis que placer une bombe à proximité d'une installation est toujours délicat, à cause de la surveillance. En outre, le missile pénétrera dans l'installation, tandis que la bombe sera nécessairement placée à la périphérie.

Beaucoup de pays ont développé des programmes de missiles à moyenne portée (50 km - 500 km) ; la technologie nécessaire est plus que proliférante. La portée requise ici (de l'ordre de 5 km) est très inférieure et très facile à obtenir.

II. La prolifération scientifique

C'est un aspect qui inquiète beaucoup les responsables.... depuis 50 ans ! Mais aucune restriction sérieuse n'a jamais été apportée. La question est en apparence très simple : devons-nous laisser des ressortissants (pris au sens large) d'Etats plus ou moins amicaux accéder librement à notre connaissance scientifique ? Il y a une variante commerciale à cette question : devons-nous laisser des ressortissants de pays susceptibles de nous faire concurrence avoir libre accès à nos technologies ? Est-il par exemple légitime de confier des commandes de logiciels à l'Inde, sachant que ce pays, instable, peut parfaitement devenir inamical, et peut aussi exercer une très forte concurrence sur le marché mondial du logiciel, au détriment de nos propres sociétés ?

Sur ces questions, il convient d'adopter une attitude pragmatique :

- Il n'est pas sain de vouloir limiter la diffusion des idées en sciences fondamentales. Les congrès et colloques sont normalement les lieux où les scientifiques confrontent leurs idées ; limiter l'accès selon des critères de nationalité conduit à un appauvrissement. La France aurait plus à perdre qu'à gagner à de telles restrictions ;
- Sur la plupart des questions qui nous occupent ici, les idées scientifiques à mettre en œuvre sont du domaine public. Elles sont disponibles dans des ouvrages spécialisés, que n'importe qui peut se procurer (exemple : guidage des missiles, vision IR, etc.).
- La contrepartie des exportations est très souvent que les pays acquéreurs demandent une formation, soit en France, soit chez eux : ce peut être une formation pour des pilotes, des cours pour les ingénieurs, etc. Il ne s'agit pas d'une simple acquisition "sur étagères" ; le pays concerné demande un véritable transfert de technologie.
- La concurrence est sévère, et si nous n'acceptons pas les conditions du pays acquéreur, d'autres le feront : la Russie ou la Chine, mais aussi l'Angleterre et le USA.

En revanche, il est complètement évident que si nombre de pays (Chine, Corée, Inde, Pakistan, etc.) ont pu développer un programme nucléaire et un programme de missiles, c'est grâce à l'enseignement que leurs ressortissants ont reçu dans les Ecoles et Universités Occidentales ou Russes. Nous avons clairement aidé au développement de ce

qui peut à terme constituer un danger pour nous. Danger militaire, peut-être ; risque de sécurité, sans doute ; concurrence commerciale, à coup sûr.

III. La réponse : procéder par modules identifiés

Il est extrêmement intéressant d'observer que la circulation de la science fondamentale n'a pas permis de résorber le gap technologique entre pays. Cela fait au moins 50 ans que la science fondamentale est en libre circulation. Pourtant, globalement,

- le gap technologique entre la France et les USA s'est creusé, à notre détriment ;
- le gap technologique entre l'Afrique et l'Europe s'est creusé ;
- le gap technologique entre l'Asie du Sud Est et l'Europe s'est comblé.

N'importe qui, par définition, peut lire les publications sur un sujet donné et en tirer parti. Mais ces publications sont souvent ésotériques, contradictoires, et peu exploitables directement. Bien peu débouchent sur un appareil prototype, et on ne sait pas a priori lesquelles. Il n'y a donc aucun inconvénient à ce qu'on laisse des pays inamicaux prendre connaissance de nos publications, même au travers d'experts que nous aurons formés. La connaissance scientifique de pointe, en ces domaines, se périme très vite et la fraction utilisable est très faible. On ne peut que recommander l'ouverture d'un cours de cryptographie à l'Ecole Normale Supérieure, à destination des pays du tiers monde !

Le niveau technologique d'un pays, actuellement, tient en vérité à la capacité de ce pays à concevoir, produire, commercialiser, des systèmes miniaturisés et intégrés, c'est à dire des systèmes regroupant à l'intérieur d'une même "boîte noire" des composants les plus compacts possible.

Ceci explique complètement l'évolution des gaps technologiques citée plus haut. L'Asie du Sud Est a développé une excellente capacité industrielle en circuits miniaturisés ; elle a largement vendu ces circuits au monde entier (magnétoscopes, lecteurs laser, etc.).

Nous ne parlons pas ici seulement d'électronique, mais de l'ensemble du traitement de l'information : acquisition du signal ou de l'image, traitement, transmission, réactions, etc.

La mise au point de système hautement miniaturisés est très complexe et très difficile. Elle requiert des études préalables et un dispositif industriel spécialisé (salles blanches, etc.), tout ceci étant extrêmement coûteux. En apparence, de plus, dans bien des cas, elle ne sert à rien ! Voyons ceci sur un exemple particulièrement frappant.

Dans une automobile moderne, l'électronique est partout. Elle servira aussi bien à une alarme anti-vol qu'au réglage de l'allumage et même de l'admission d'essence. Tout ceci est bien accepté de l'utilisateur, qui y voit un progrès : une automobile moderne fonctionne mieux et consomme moins qu'une automobile d'il y a trente ans.

L'électronique est aussi présente dans le contrôle des maintenances : elle vous signale à quel kilométrage vous devez effectuer la vidange, et, si celle-ci a été faite chez un concessionnaire agréé, le signal indiquant la nécessité d'une vidange disparaît.

Si, en revanche, la vidange est faite chez le garagiste du coin, le signal électronique indiquant la nécessité d'une maintenance continue d'apparaître, parce que ce garagiste ne dispose pas des appareils électroniques nécessaires, que possèdent seuls les concessionnaires (une plainte a d'ailleurs été déposée à Bruxelles contre cet abus).

Nous constatons donc ceci : le constructeur automobile a dépensé beaucoup d'argent pour implanter un système électronique qui, a priori, ne sert à rien : n'importe qui sait, en regardant le totalisateur kilométrique, qu'il doit faire sa vidange au bout de 20 000 km. Mais, ce faisant, le constructeur gagne beaucoup d'argent, parce qu'il ne se contente plus de vendre des automobiles ; il assure le monopole de leur maintenance leur vie durant ! Faux progrès technologique, mais véritable habileté commerciale.

Cette comparaison avec l'automobile est particulièrement frappante. Dans les années 60-70, n'importe quel garagiste en Afrique pouvait réparer, dépecer, trafiquer, n'importe quelle automobile, la bricoler avec des pièces prises sur d'autres voitures ou bien usinées à la main. Essayez donc aujourd'hui de faire réparer une automobile moderne en dehors d'un concessionnaire spécialisé ! Les constructeurs ont su éviter la prolifération...

IV. Quels systèmes sont concernés ?

La réponse est simple : tous ceux où entre un embryon d'électronique, c'est à dire à peu près tous. Sont seuls exclus les systèmes purement mécaniques, comme une mitrailleuse. Mais une simple Jeep comporte une alimentation électrique, un allumage, une admission d'essence, susceptibles de régulation et de miniaturisation. C'est le cas aussi, bien sûr, de tous les appareils électriques, et tous les appareils dont un fonction quelconque est électrique (alimentation au démarrage, etc.).

Seconde Partie

Les trois mots-clé :

Miniaturisation,

Maintenance,

Obsolescence

La méthode que nous préconisons, tant pour éviter la prolifération du matériel sensible que pour réduire les dangers de concurrence, se traduit par trois mots-clé : Miniaturisation, Maintenance, Obsolescence.

I. La miniaturisation

Elle signifie que les systèmes concernés doivent se décomposer en sous-systèmes, chacun de ceux-ci étant aussi miniaturisé, compact, que possible. Chaque sous-système doit apparaître comme une "boîte noire", enfichable au bon endroit avec le bon connecteur. Cette boîte noire ne doit pas normalement pouvoir être ouverte, ou, si elle l'est, elle ne doit rien révéler. Les circuits sont gravés à l'échelle la plus fine, les instructions sont incorporés au micro-processeurs etc.

Ici la miniaturisation a pour objectif de rendre les choses incompréhensibles. Certes, il y a des considérations de poids, de facilité de stockage, de facilité de remplacement, qui pourront être mises en avant, mais l'objectif principal est que le fonctionnement du sous-système sera opaque à l'utilisateur.

Pour prendre une comparaison, n'importe qui possédant des notions d'électronique de base pouvait réparer un récepteur radio dans les années 60 : les tubes étaient apparents ainsi que les connexions, sur circuits imprimés. La logique de fonctionnement était évidente, et il suffisait d'un voltmètre et d'un ampèremètre pour tout comprendre et tout réparer. En revanche, même pour un spécialiste convenablement formé, il est devenu impossible de reconstituer le fonctionnement d'un appareil moderne, doté de micro-processeurs. C'est particulièrement vrai lorsque les circuits (qui ont une réalité physique) sont remplacés par des transferts d'instructions : que met-on dans chaque mémoire à chaque instant ?

Cette miniaturisation doit être conçue dès le début, avec l'appareil lui-même. Il ne sert à rien de prévoir un composant miniaturisé (par exemple une alimentation) si celle-ci peut être retirée et remplacée par une alimentation ordinaire. Il faut que l'ensemble du système soit conçu pour fonctionner avec ce composant-là et celui-là seulement.

La miniaturisation a un coût, et ce coût est très élevé, tant au niveau de la conception qu'au niveau de la fabrication. Mais les Industriels, qui en sont les vrais inventeurs, y voient des bénéfices très clairs, et ce sont ceux que nous voyons nous-mêmes : facilité de gestion des sous-systèmes (plus de stocks inutiles en pièces détachées : on remplace le sous-système tout entier) et bonne garantie contre les copies illicites.

Il ne devrait donc pas être difficile de convaincre les Industriels que le processus de miniaturisation peut jouer un rôle dans la protection des matériels sensibles.

II. La maintenance

Un appareil, quel qu'il soit, est généralement assorti d'une garantie : période pendant laquelle le constructeur s'engage à remédier gratuitement aux défauts qui pourraient être constatés.

La maintenance, en revanche, est un concept beaucoup moins bien accepté : il signifie que le matériel, pour rester en conditions opérationnelles, doit être révisé périodiquement. Cette révision, évidemment, ne peut être assurée que par le constructeur ou par des spécialistes formés à cet effet.

Tout le monde accepte l'idée d'une maintenance (préventive) pour les avions civils ou militaires : au bout de tant d'heures de vol, on remplace telle pièce, on vérifie telle autre.

La maintenance des automobiles commence seulement à entrer dans les mœurs. Une faible fraction des usagers effectue les révisions périodiques ; une plus faible encore se soucie des pièces à longue durée de vie, comme les amortisseurs. L'Etat a donc été obligé d'instaurer un contrôle obligatoire : une visite technique tous les deux ans.

Pour les matériels sensibles qui nous intéressent, la prolifération se traduit par une absence de maintenance. Le matériel, par exemple un lance-roquettes, a été vendu plusieurs fois, et personne ne se soucie de l'entretenir. Il n'est pas question de le renvoyer au constructeur pour une visite de contrôle !

Pour nous, au contraire, la nécessité d'une maintenance est un élément-clé de la lutte contre la prolifération. Ce système, que ce soit un missile ou une caméra thermique, doit être vendu en précisant bien que son maintien en condition opérationnelle requerra une maintenance, dont le contenu, la périodicité et le coût seront fixés lors de la vente.

Ceci est évident pour une caméra ; ce l'est peut-être moins pour un missile qui est destiné à servir une seule fois. Mais MBDA considère qu'un missile est un objet industriel comme un autre : on le révisé, on l'entretient, on fait des essais, pour être sûr que, le jour où on en aura besoin, il sera véritablement en état de fonctionner.

Un matériel sensible doit donc être vendu, en France et à l'étranger, avec un plan de maintenance clair et strict. Ce plan de maintenance a évidemment pour objectif d'assurer le maintien en condition opérationnelle de l'objet, mais inversement il permet au fabricant ou à ses représentants de savoir où est le matériel et dans quelles conditions il est (par exemple, a-t-il fait l'objet d'une tentative de démontage ?).

III. L'obsolescence

Ce qui pose problème dans la prolifération d'armes de type lance-roquettes, c'est qu'elles sont encore en bon état de fonctionnement quarante ans après leur fabrication. A l'inverse, plus les systèmes sont sophistiqués et plus ils tombent en panne facilement, et plus la maintenance est nécessaire. Aucun système électronique ne dure 40 ans : les connexions se désagrègent, les condensateurs claquent, etc.

Si l'on pense à des systèmes plus modernes, la durée de vie est encore plus courte. Si enfin on accède à l'âge de l'informatique, non seulement les pannes se multiplient mais l'obsolescence du système est très rapide : il devient immédiatement incompatible avec toutes les autres générations.

Cette notion de durée de vie du système sera le troisième élément-clé du processus de contrôle de la prolifération. La durée de vie du système sera spécifiée lors de la vente et sera contractuelle. Elle sera prolongée par les maintenances contractuelles, mais, si ces maintenances ne sont pas réalisées, le système deviendra inopérant.

On peut par exemple imaginer qu'un missile, une caméra thermique, soient vendus pour une durée indéfinie, mais avec obligation de maintenance tous les ans. Si la maintenance est faite, on sait où est l'objet ; si elle n'est pas faite, au bout de 14 mois l'objet tombe en panne. Il suffit qu'il dispose d'une horloge, sous forme d'un micro-processeur avec des instructions appropriées, pour que la panne apparaisse au moment voulu. Tous les micro-processeurs ont une fonction horloge, et l'existence d'instructions supplémentaires est indécélable. Il faut veiller à ce que la panne ne soit pas réparée simplement en retirant l'horloge : mais cette horloge n'a pas de réalité physique, ce n'est pas un cadran avec des aiguilles ; c'est un ensemble d'instructions informatiques données à un micro-processeur.

L'obsolescence ne se réduit pas à une panne si la maintenance n'est pas faite. Il y a une gestion délicate des avancées techniques. Les technologies évoluent, et donc l'acheteur veut généralement "moderniser" le matériel qu'il a acquis : par exemple rendre le missile plus précis et la caméra plus sensible. Ceci sera fait par le constructeur en remplaçant les boîtes noires par d'autres boîtes noires, évidemment incompatibles avec les précédentes.

Les versions antérieures ne sont plus maintenues. Cette politique d'obsolescence programmée, qui correspond évidemment à un progrès technologique, rend très difficiles les copies illicites, les contre-façons. Si un pays cherche à copier un matériel A, il y parvient en formant des ingénieurs, en achetant des exemplaires de A, en les dépeçant, analysant, etc. Mais tout ceci prend du temps, et le temps qu'il y parvienne, nous sommes déjà passés au matériel B, et le matériel A est non seulement obsolète, mais même totalement inutilisable, parce qu'il ne correspond plus à aucun standard du marché. On ne trouve plus les pièces, les éléments, les composants. C'est ce qui s'est passé en informatique : les petits constructeurs n'ont pas pu suivre la course du progrès technologique lancée par les grands constructeurs.

Les trois mots-clé : miniaturisation, maintenance, obsolescence, nous donnent un contrôle complet de la prolifération des matériels sensibles :

- la miniaturisation assure que l'acheteur n'y comprend rien ;
- la maintenance l'oblige à faire appel à nous pour assurer l'entretien du matériel : nous savons ainsi où il est et dans quel état il est ;
- l'obsolescence assure que le matériel ne fonctionne plus si la maintenance n'est pas correctement assurée ; en outre, les versions successives, incompatibles entre elles, nous permettent d'assurer notre avance technologique.

Dans beaucoup de domaines, les découvertes sont protégées par des brevets, qui sauvegardent les droits de l'inventeur. Mais en pratique ces brevets sont souvent tournés, et la protection est largement illusoire. En mathématiques, il n'y a pas de brevet possible : les idées ne sont pas brevetables. Pour les protéger, il faut garder une avance sur les autres : pendant que certains s'efforcent de comprendre ce qui a été fait voici 5 ou 10 ans, nous en sommes déjà à l'idée suivante. Nos préconisations pour la protection des matériels sensibles relèvent de la même idée : on peut certes chercher à protéger (c'est la miniaturisation), mais on doit aussi rechercher l'évolution permanente (c'est l'obsolescence).

Troisième partie

La mise en œuvre des procédures MMO

I. Description sur un exemple

Les procédures MMO (Miniaturisation, Maintenance, Obsolescence) sont délicates et coûteuses à mettre en œuvre. Elles sont plus facilement appliquées aux matériels de haute technologie qu'aux matériels ordinaires, encore qu'elles soient parfaitement concevables pour une Jeep.

Le système concerné doit être conçu dès l'origine avec l'idée de mettre en œuvre les procédures MMO : il faut donc la participation active des industriels. Mais, comme nous l'avons dit plus haut, ces procédures vont dans le sens que les Industriels recherchent : contrôle du marché et restriction de copies illicites. Il devrait être relativement simple de les convaincre.

Prenons l'exemple d'une caméra thermique et voyons comment pourrait se dérouler la procédure.

L'Industriel qui a conçu la caméra déclare qu'elle est composée de (mettons) trois sous-ensembles : appelons-les S1, S2, S3.

Pour chacun d'eux, il précise les dates de maintenance prévues et la durée de vie en l'absence de maintenance. Mettons, pour fixer les idées, que la maintenance soit tous les ans ; en l'absence de maintenance, le système sera en panne au bout de 14 mois.

L'industriel renseigne aussi un champ appelé "obsolescence". Il sait par exemple que le module S1 fait l'objet de travaux de recherche en interne ; d'ici 2 ans, l'industriel compte mettre sur le marché un nouveau module S1 plus performant. Il le proposera donc à son client. Ce champ est évidemment non contractuel : l'Industriel n'est pas obligé de faire progresser le module S1, mais il est dans son intérêt de le faire, et s'il le fait il lutte contre la prolifération.

Il présente donc une demande d'exportation libellée comme suit :

Pays de destination	Appareil	Module	Maintenance	durée de vie	obsolescence
X	Caméra thermique	S1	annuelle	14 mois	2 ans
		S2	annuelle	14 mois	3 ans
		S3	annuelle	14 mois	5 ans

La Commission d'Exportation des Matériels de Guerre (CIEMG) peut alors prendre une décision en toute connaissance de cause : si elle estime que la possession d'une caméra thermique par le pays X, pendant 14 mois, ne présente pas de danger, elle autorisera l'exportation. L'indication de durée est un élément de décision tout à fait précieux. Si au bout d'un an la politique à l'égard du pays X a changé, le CIEMG peut interdire la maintenance et le système tombera en panne....

Au bout d'un an, la maintenance faite, l'Industriel envoie un bordereau complémentaire (obligatoire) au SGDN.

Pays de destination	Appareil	Module	Maintenance 2002	périodicité	durée de vie	obsolescence
X	Caméra thermique	S1	faite	annuelle	14 mois	2 ans
		S2	faite	annuelle	14 mois	3 ans
		S3	faite	annuelle	14 mois	5 ans

Lorsque, deux ans après, le module S1 est remplacé par un module S'1 plus performant, un suivi est réalisé :

module	durée de vie	maintenance	obsolescence
S1	14 mois	annuelle	2 ans

est remplacé par :

module	durée de vie	maintenance	obsolescence
S'1	14 mois	annuelle	3 ans

Tous ces bordereaux font l'objet d'un envoi annuel obligatoire au SGDN, par l'Industriel. En revanche, l'Industriel n'a pas à redemander l'autorisation d'exportation (sauf modification du système) : une fois que l'autorisation d'exportation est accordée, elle est reconduite tacitement, sauf modification de notre politique à l'écart du pays X : en ce cas, c'est au SGDN d'informer l'Industriel.

Ce système doit faciliter la gestion des exportations. L'Industriel ne demande l'autorisation qu'une seule fois. L'Etat sera beaucoup plus facilement enclin à la lui accorder, sachant qu'il aura un suivi sur le lieu où le système se trouve et sur l'utilisation qui en est faite. L'Industriel est tenu uniquement à produire un bordereau de suivi annuel pour chaque système.

II. Possibilités de fraude

La fraude la plus usuelle concerne un détournement du matériel : il a été vendu à un pays X, mais est utilisé en réalité par un pays Y. Cette possibilité est beaucoup réduite avec le système préconisé ici : il faudrait que chaque année le matériel soit rapporté à X pour maintenance. Ce n'est pas impossible, mais ce n'est pas facile à réaliser. L'ensemble des procédures limite considérablement la possibilité qu'un matériel, vendu normalement à un pays autorisé, se retrouve en des mains inamicales après plusieurs ventes successives.

Toute autre possibilité de fraude requiert la complicité de l'industriel, puisque c'est lui qui assure la maintenance du matériel, une fois par an.

III. Revoir la nomenclature du SGDN

Si les procédures MMO sont mises en œuvre, la nomenclature des pays réalisée par le SGDN pourrait être revue. Elle distingue actuellement 4 groupes de pays (A,B,C,D). En

98, nous avons proposé de le réduire à 3. On pourrait se contenter de distinguer un groupe de pays, auxquels l'exportation serait interdite parce que nous craignons qu'ils n'en fassent un usage immédiat à l'encontre de notre sécurité (Iran, Irak,..). Les pays neutres ou plus ou moins instables, les éventuels concurrents (Inde, Pakistan, etc.), n'auraient plus de raison d'être exclus.

IV. Ces procédures peuvent-elles nuire à nos exportations ?

Certainement pas aux exportations normales : l'assurance d'avoir une maintenance à long terme est au contraire un argument commercial très fort.

V. Ces procédures ne renforcent-elles pas l'excès le rôle de l'Industriel, au détriment de celui de l'Etat ?

Le rôle de l'Industriel est en effet essentiel, puisque c'est lui qui se charge de contrôle relatif aux maintenances. Mais en procédant à ces vérifications, il agit au nom de l'Etat et il rend compte au SGDN. L'Etat peut décider d'interdire les relations avec tel pays, auquel cas les maintenances des systèmes vendus à ces pays sont interdites. Ceci s'est déjà produit : la France a refusé de vendre des pièces détachées pour des système déjà vendus.

VI. Mise en œuvre

Nous recommandons une mise en œuvre progressive, avec certains industriels pour commencer, sur la base du volontariat, par exemple pendant un an ou deux. Les procédures pourraient ensuite être étendues et généralisées.

Quatrième partie

La mise en œuvre sur un système spatial : l'observation par satellite

Nous allons maintenant voir comment mettre en œuvre les idées générales, développées précédemment, dans le cas particulier d'un système d'imagerie satellitaire. Il est nécessaire pour cela de bien apprécier à quoi servent ces systèmes, et ce n'est pas facile, car de nombreux mythes ont été répandus.

I. Composition du système

Un système d'observation par satellite se compose de :

- un ou plusieurs satellites qui prennent des images (dans le visible, l'infrarouge, grâce à un radar, etc....) ;
- une ou plusieurs stations de réception ;
- une ou plusieurs stations d'analyse et de traitement des images.

Le traitement lui-même se décompose essentiellement en deux phases :

- une phase « bas niveau » qui consiste à filtrer le signal, l'améliorer, rehausser les contrastes si nécessaire, etc. ;
- une phase « haut niveau » qui consiste à l'interpréter (par exemple, détecter ce qui a bougé d'une image à l'autre). Ceci peut être fait, selon les cas, de manière automatique ou par un opérateur humain.

La station de réception et la station d'interprétation peuvent être situés à grande distance l'une de l'autre : lors de la Guerre du Golfe les Américains faisaient traiter les images recueillies par les satellites par des stations situées à plusieurs milliers de km. Le lien entre les deux se fait par ondes hertziennes, et la transmission est quasi-instantanée.

La raison pour laquelle les deux sont distincts est que la station de traitement haut niveau requiert des moyens informatiques lourds, y compris l'accès à des banques de données.

Le traitement des images (et tout particulièrement dans le cas d'images radar) n'est nullement facile. Très rares sont les cas où il peut être fait de manière automatique : la présence d'opérateurs humains, spécialement formés, est presque toujours requise. Le traitement nécessite de très importantes bases de données, des algorithmes très sophistiqués, et, bien entendu, des calculateurs appropriés. Nous y revenons plus bas.

Du fait de la complexité du traitement, il est très rare que l'on puisse disposer de l'information en temps réel, c'est à dire quelques minutes ou quelques heures après la prise de vue par les satellites. Les images montrées par la télévision lors de la guerre du Golfe constituent à cet égard des exceptions. Dans la plupart des cas, le traitement des images, en vue de leur exploitation, demande des jours, voire des mois de travail.

II. L'exportation d'un système d'imagerie satellitaire

Deux questions se posent, qui peuvent limiter les exportations :

- Le système peut-il être utilisé contre nos intérêts ou ceux de nos alliés ?
- En vendant un tel système, favoriserons-nous une concurrence économique ultérieure ? Donnerons-nous accès à des technologies qui, employées par des pays émergents, leur permettront d'ici quelques années de nous faire concurrence sur certains marchés ?

Les deux questions sont très distinctes, et il n'est pas sain de vouloir les traiter en même temps.

III. Utilisations civiles et utilisations militaires d'un système d'observation par satellite

Les utilisations militaires sont bien connues : observation de troupes, de constructions, mouvements de blindés ou de camions, etc.

Les utilisations civiles sont plus récentes, moins bien établies, mais apparaissent prometteuses :

- surveillance de larges zones pour les intempéries ou les sinistres : inondations, incendies ;
- surveillance de l'agriculture sur une large échelle (zones cultivées, forêts, etc.) ;
- météorologie ;
- surveillance des pollutions (nappes de mazout à la surface de la mer...) ;
- surveillance de la qualité de l'air (détection des particules en suspension dans l'atmosphère...).

La capacité de vision n'est pas la même dans les différents cas. Par exemple, les satellites qui servent à détecter les particules dans l'atmosphère ont un pixel de l'ordre de 25 km² : ils visent de larges zones, de manière imprécise. À l'inverse, la détection des incendies requiert une précision de l'ordre de la centaine de mètres, la surveillance de l'agriculture de l'ordre de quelques mètres.

Il est raisonnable de dire que *pour le moment* les besoins de défense requièrent une précision supérieure aux besoins civils, mais cette distinction est évidemment susceptible de s'estomper.

IV. Utilisations militaires : la concurrence des drones

La technologie des drones (avions sans pilote) s'est considérablement perfectionnée au cours de ces dernières années, notamment en termes d'autonomie. Ils apparaissent désormais comme une alternative séduisante aux satellites d'observation, notamment par quatre aspects :

- coût de lancement et d'utilisation très inférieur ;
- déploiement local quasi-instantané ;
- présence permanente, pendant une certaine durée, sur une zone donnée ;
- possibilité de guidage.

Le satellite reste préférable pour l'observation de larges zones, mais des drones sont désormais capables de surveillance à haute altitude. Le drone prend les images, les transmet ou les enregistre, puis revient se poser ; il repart ou on en envoie un autre. C'est une sorte de « consommable » plus ou moins réutilisable. Le satellite requiert des moyens de lancement sophistiqués et coûteux, est tributaire de son orbite (qui peut être modifiée, mais pas instantanément) et n'est généralement pas réutilisable.

Voici un exemple : l'Australie commercialise un drone de 15 kg (dont 4 kg d'essence), destiné à suivre les tornades. Il vole à 1 500 m et dispose de 34 heures d'autonomie. Le drone est pré-programmé (aucun pilote au sol) et il transmet l'information en temps réel. Le coût total du système est de l'ordre de 100 000 dollars.

V. Mais quelle utilisation militaire ?

Il est clair que la connaissance des concentrations de troupes ou de moyens adverses, acquise par renseignement, est un élément stratégique majeur en cas de conflit. La France et ses alliés l'utilisent systématiquement lors de tous les conflits et de toutes les crises. Mais est-ce un élément déterminant de suprématie ?

La réponse était « oui » face à un adversaire comme l'URSS ; elle est clairement « non » face à des pays comme l'Iran, l'Irak, la Corée du Nord, etc. Elle est également « non » face à un pays comme la Chine, qui peut devenir un adversaire potentiel dans 15 ou 20 ans. Que l'Irak ou la Chine disposent ou non, actuellement, d'un système de surveillance par satellites permettant, par exemple, de localiser nos navires nous importe peu, il faut le dire clairement.

La France, comme n'importe quel pays, est survolée en permanence par quantité de satellites ; les informations (même récentes) quant à l'« état » du territoire ne nous inquiètent pas. Peu nous importe que tel pays sache ou non que tel régiment est ou non dans sa caserne, que tel bâtiment a quitté le port, etc. : de telles informations pouvaient être critiques du temps de la guerre froide, mais elles ne le sont plus aujourd'hui, bien que beaucoup de gens n'en aient pas encore pris conscience. Observons en outre que si des terroristes voulaient se renseigner sur la position de telle force de gendarmerie, ce n'est certainement pas par satellite qu'ils le feraient, mais par simple renseignement humain.

Même dans l'hypothèse d'un conflit, du type guerre du Golfe ou Kosovo, si l'adversaire a une connaissance précise de l'emplacement de nos forces, cela ne change rien à la suprématie des forces des alliés. Cette connaissance précise est largement publique, et n'importe quel avion peut l'acquérir bien mieux qu'un satellite.

Ce qui nous importe davantage, en revanche, c'est l'accès de certains pays aux *technologies spatiales*, ce qui est tout différent !

Les deux menaces auxquelles nous ayons à faire face dans l'immédiat sont :

- Une possible attaque par missiles, lancée par un pays inamical. Cette attaque concernerait nos villes, et elle ne serait pas précise. C'est typiquement ce dont a souffert Israël lors du dernier conflit avec l'Irak ; ce pays a envoyé quelques dizaines de missiles « Scud » sur le territoire israélien. La menace « missile » de ce type est celle que le bouclier antimissile américain veut combattre.
- Une attaque terroriste, soit contre le territoire national, soit contre nos intérêts à l'étranger (ambassades, navires, usines, etc.).

Dans les deux cas, on s'aperçoit que la possession d'un système d'imagerie satellitaire par le pays hostile n'ajoute rien à la menace. De manière générale, un système d'imagerie satellitaire est un système sophistiqué, alors que les menaces dont nous parlons sont des menaces frustes (même si le missile est à longue portée).

On a souvent tendance à se faire une idée par trop favorable de l'intérêt réel, pour la défense, de l'observation par satellite. Un satellite seul ne sert pratiquement à rien. S'il est géostationnaire (36 000 km d'altitude), il ne perçoit aucun détail. Pour qu'il puisse voir de manière utilisable, il doit être en orbite basse (de l'ordre de 800 km) et dans ces conditions, il défile extrêmement vite. Il ne restera au dessus d'une zone donnée que quelques minutes par jour .

Il est donc nécessaire de disposer de tout un ensemble de satellites, pour pouvoir en tirer parti à des fins militaires. De plus, ces satellites ne doivent pas se contenter d'opérer dans le visible : ils seraient inutilisables par mauvais temps et la nuit. Il faut combiner l'information donnée par le visible, l'infrarouge, et, plus généralement par des caméras « multi-spectrales », c'est à dire opérant dans plusieurs bandes à la fois ; de tels satellites coûtent plusieurs milliards de dollars pièce.

A l'heure actuelle, seuls les USA ont un système complet d'observation par satellite. L'OTAN, en particulier, suit de manière automatique tous les vaisseaux pénétrant en mer du Nord. Cela demande très certainement un matériel considérable et très coûteux, et la pertinence même de cette surveillance paraît discutable. D'une part, il est certainement possible de maquiller un bateau suspect pour qu'il soit confondu avec un autre par les satellites ; d'autre part l'intérêt réel ne porte que sur quelques unités particulières, qu'il serait probablement plus facile de suivre à la jumelle à partir de la côte.

L'Europe n'a jamais réussi à s'entendre sur une stratégie commune en matière d'observation par satellite, dans le domaine de la défense (ni d'ailleurs dans le domaine civil, comme on le verra plus bas).

Il ne faut pas juger les performances d'un système en se limitant à la seule résolution. Bien d'autres paramètres doivent être pris en compte : le nombre de passages au dessus

de la zone concernée, la taille de la mémoire, le débit qui permet de vider celle-ci, la capacité stéréoscopique (pour réaliser des modèles numérisés de terrain), l'agilité du satellite et sa durée de vie, pour ne citer que les principaux. Il n'est pas sain de juger des capacités d'un satellite seul, et surtout pas sur un seul critère : ce sont les performances d'ensemble qu'il faut considérer.

Nous concluons ce paragraphe de manière extrêmement simple : l'acquisition d'un système d'observation par satellite par un pays inamical ne menacerait en rien nos intérêts et ne lui servirait à rien (sauf à gaspiller de l'argent, ce qui est plutôt une bonne chose). Il n'est certainement pas utile de restreindre de telles ventes.

Disons-le clairement : on a exagéré, au cours de ces vingt dernières années, l'importance des systèmes d'observation par satellite en matière de défense. Ils étaient légitimes contre l'URSS ; ils ne le sont plus guère aujourd'hui – ce ne sont pas les USA après les attentats du 11 septembre 2001 qui diront le contraire. Il faut certes des systèmes d'observation, mais il faut aussi quantité d'autres sources de renseignement, et le bilan global des coûts et de l'efficacité est probablement à reprendre entièrement.

VI. Le contrôle de l'utilisation du système

Il est tout à fait concevable qu'un pays inamical, ou susceptible de devenir inamical, acquière un système civil d'imagerie satellitaire (météo, ou surveillance de l'agriculture, etc.) avec comme arrière pensée l'obtention de renseignements militaires. A l'heure actuelle, comme nous l'avons dit plus haut, les précisions requises par les appareils ne sont pas les mêmes et la distinction serait facile à faire. Mais on peut imaginer que les systèmes civils évolueront vers une plus grande précision : cela s'est produit dans de nombreux domaines. La question se pose donc : faut-il restreindre la vente d'un tel système, qui serait précisément « dual » (civil et militaire) et, si la vente est autorisée, faut-il surveiller l'usage qui est fait du système ?

A la première partie de la question, nous avons déjà répondu de manière positive : nous considérons en effet que la vente d'un système d'imagerie ne nous met pas en danger et n'affecte en rien notre suprématie.

A la seconde partie de la question, nous répondons que le contrôle d'utilisation n'est ni possible ni souhaitable. Techniquement, il est assez facile de suivre un satellite en orbite, et de vérifier qu'il est bien où il devrait être. En pratique, il y a une grande quantité d'objets en orbite et la France en a perdu le recensement. Cela demanderait des moyens importants (stations au sol), que nous n'avons pas et qui ne nous paraissent pas utiles dans le contexte actuel.

On peut aussi installer des « mouchards » à bord du satellite. Sur interrogation d'une station sol spécialement équipée, le satellite révèle où il est allé et ce qu'il a vu. Cette technologie est relativement simple à mettre en œuvre et ne dégrade pas les performances normales du satellite : le pays qui l'a acheté fait ce qu'il veut, mais nous en sommes informés. C'est dangereux sur le plan commercial si la chose s'ébruite : aucun pays ne nous achèterait plus quoi que ce soit, de peur que nous observions toute son activité au travers des appareils vendus. Que ne dirait-on pas si on apprenait que Microsoft met des mouchards dans son système d'exploitation « Windows » ? Nous pensons que, du fait du faible intérêt de l'information et de l'importance du risque, le jeu n'en vaut pas la chandelle.

La meilleure parade, si vraiment on veut prendre ce danger au sérieux, serait l'apparition de « pannes » si le satellite est au-dessus d'un endroit où il n'est pas censé être. Si un pays achète un satellite pour surveiller l'agriculture (ce qui n'a rien de répréhensible), le satellite est supposé se trouver au dessus du pays en question. Il peut parfaitement tomber en panne si par mégarde il survole des installations sensibles. Le pays fautif n'ira pas s'en vanter, et le risque commercial est nul. La panne peut être provoquée par un dispositif interne au satellite (certaines coordonnées sont interdites) ou bien externe (transmission radio à partir du sol, qui brouille la caméra). Chacun croira que la zone sensible possède un dispositif de brouillage d'un type nouveau, d'autant que le satellite marche fort bien ailleurs... Cette solution est meilleure, plus crédible et plus fiable, que celle qui repose sur un contrôle d'attitude du satellite.

Dans la plupart des cas, les nouveaux systèmes ont une utilisation « duale » (civile et militaire) et même triple : « gouvernement », commercial, et défense. La Défense achète une partie des images, et des clauses sont officiellement prévues : par exemple, certaines zones ne pourront être surveillées en période de conflit, ou bien la qualité des images sera dégradée.

VII. Mythes et réalités des systèmes commerciaux d'observation par satellite

La première réalité est qu'il y a abondance, et même pléthore, de systèmes civils : une douzaine de nouveaux programmes sont en cours de lancement. On lira en annexe l'évolution des programmes, pays par pays, avec les budgets (source : Euroconsult).

La plupart de ces programmes sont gouvernementaux, avec parfois une tentative commerciale complémentaire : tous cherchent à vendre des images à qui veut en acheter. Ces programmes sont chers et ne sont pas rentables : ils cherchent donc des acheteurs. Il serait intéressant d'étudier, suivant les cas, le laps de temps nécessaire pour acquérir une image spécifique.

Dans la plupart des cas, les systèmes d'observation par satellite n'ont pas tenu leurs promesses, ce qui signifie qu'ils ont été incapables de fournir les informations pour lesquelles ils avaient été achetés. Voici quelques exemples significatifs :

- Dans le cas d'inondations, les satellites ne servent à rien, parce qu'en général il pleut ! Le satellite commence à voir lorsque l'inondation est terminée (il faudrait adjoindre à l'observation dans le visible une observation radar).
- On espérait voir les containers perdus par un bateau en mer, mais le satellite s'en est révélé incapable ;
- On espérait détecter des nappes de pollution, mais le satellite n'a pas su le faire ;
- La SNCF espérait que les images de SPOT permettraient de préciser le tracé de la ligne du TGV Est, mais ces espoirs ont été déçus. De manière générale, la résolution de l'image satellite est beaucoup trop mauvaise pour les travaux de terrassement, etc.

- L'Égypte a acquis à grands frais une station SPOT, qui permet de récupérer en tout et pour tout un très petit nombre d'images, inutilisables en pratique.
- A la suite des tempêtes de décembre 99, on espérait faire un bilan des arbres abattus, en utilisant le satellite SPOT 4, mais la résolution était insuffisante (information communiquée par la DAS).
- Les satellites d'observation américains n'ont pas fourni les moindres données, le 2 août 1990, sur l'invasion éclair du Koweït par l'armée irakienne (E. Luttwak).
- Nous-mêmes avons cherché, dans le cadre d'un projet en partenariat avec Météo-France, l'INERIS, l'INSERM et EdF-GdF-Services de Santé, à évaluer les effets sur la santé de la pollution par les particules. Le satellite s'est révélé incapable de détecter les particules : Météo-France a réussi, en tout et pour tout, à trouver deux images sur huit mois !

Tout n'est pas négatif : des images, prises par les militaires aux USA, ont permis de suivre les cyclones et d'établir une sorte de « modèle de déplacement ». Grâce à ces images, on sait mieux comment les cyclones se déplacent, et cela permet de limiter les évacuations de population. Mais nous voyons ainsi quelle est l'échelle de travail pertinente : les cyclones couvrent plusieurs centaines de km et il faut du temps pour exploiter l'information (plusieurs mois, voire années).

Les bases de données d'images, obtenues par satellite, sont pleines de trous. Les déserts sont bien représentés, car il y fait généralement beau ; pour le reste, il ne faut pas attendre des données régulières, du fait des nuages.

Sur le plan commercial, très peu d'applications représentent un marché récurrent : la surveillance de la végétation (déforestation), mais elle n'intéresse que les gouvernements, et requiert des images en petit nombre sur une longue période ; de même des observations géologiques. On ajoutera la cartographie urbaine, qui se modifie assez rapidement. Il est assez difficile de trouver des cas où l'utilisation des satellites d'observation (même si elle fonctionnait correctement) se justifie commercialement.

Dans la très grande majorité des cas, l'utilisation quotidienne, banale, de l'observation par satellite n'est qu'un bluff commercial, absolument dépourvu de rentabilité effective. Seuls les gouvernements peuvent se l'offrir, pour des applications qu'on peut à bon droit qualifier de « régaliennes » : surveillance des feux de forêt, de l'agriculture, etc. Il n'est du reste pas clair que les gouvernements aient fait une analyse correcte en termes de rentabilité : il est très possible que des inspecteurs, ou des observateurs, coûtent moins cher et obtiennent de meilleurs résultats. En matière d'observation par satellite, il y a une très importante part de mystification, dont les agences spatiales sont les premiers auteurs.

Là encore, nous avons une conclusion très claire : des images, il y en a partout, et chacun cherche à les vendre. Récemment, Alcatel Space prévoyait de produire 22 satellites en une année, mais n'a reçu que six commandes.

VIII. L'application de la méthode MMO aux technologies d'imagerie satellitaire

Comme nous l'avons dit plus haut, notre principal souci est la limitation d'accès à nos technologies, pour éviter la concurrence, davantage que la restriction pour motif de Défense. La méthode MMO est précisément là pour répondre à ce besoin. Voyons-en les applications concrètes.

A. Miniaturisation

Sur la partie « satellite », tout est déjà miniaturisé, pour raisons de poids et d'encombrement. Il n'y a donc rien de particulier à demander. De plus, les technologies « grand public » d'images numériques ont largement rejoint et même dépassé ce que l'on peut trouver dans de nombreux satellites.

En ce qui concerne les stations sol (traitements de bas niveau et de haut niveau), il s'agit essentiellement d'implantations informatiques d'algorithmes. Ces algorithmes, dans leur principe, sont très largement publics : de nombreux centres de recherches académiques, dans le monde entier, travaillent sur le traitement de l'image. On tombe ici sur le problème, déjà abordé, de l'interpénétration entre science fondamentale et applications commerciales.

L'application de la méthode MMO donne ici une réponse très claire : on peut laisser tous les stagiaires étrangers suivre tous les cours de traitement de l'image qu'ils veulent, dans les universités. On peut laisser n'importe qui faire des publications, n'importe qui les acheter, n'importe qui faire des conférences. En revanche, on ne doit pas livrer nos systèmes commerciaux, ou de défense, de traitement de l'image avec les codes source et avec les explications techniques : on doit livrer une « boîte noire », c'est à dire un algorithme déjà sous forme d'exécutable, de préférence dans le silicium (une puce, et non un CD Rom et une disquette).

L'idée sous-jacente, présentée au cours de la première partie, se comprend extrêmement bien ici. Parmi tous les traitements de l'image élaborés par les universitaires, bien peu parviendront à maturité ; bien peu seront exploitables en pratique. Il n'y a aucun inconvénient à les livrer tous à un pays susceptible de nous copier, parce qu'il est extrêmement difficile de démêler lesquels sont prometteurs et lesquels ne le sont pas. Le pays en question sera « noyé dans la masse », et il y a tout à parier qu'il n'en sortira pas. En revanche, l'algorithme final, celui qui fait l'objet d'une véritable exploitation commerciale, ou de défense, doit rester confidentiel, non pas dans son principe, qui est connu de tous, mais dans sa mise en œuvre concrète : c'est elle qu'il faut protéger.

Nous voudrions insister ici sur le fait que le traitement de l'image, dans son ensemble, est très loin d'être parvenu à maturité : c'est un domaine que nous connaissons extrêmement bien, et dont nous mesurons les limitations. On peut à la rigueur espérer faire suivre une bande blanche à une automobile, de manière automatique, grâce à des caméras, mais il ne faut pas être trop exigeant : pas de mouvements brusques, pas de sinuosités excessives, bon contraste, faible vitesse. Les choses se compliquent lorsqu'il s'agit d'images prises dans des conditions réelles : paysage réel, non contrasté, intempéries, observateur en mouvement... a fortiori lorsqu'il s'agit d'un satellite.

Notre opinion – et nous avons à plusieurs reprises insisté sur ce point auprès du SGDN et de la DGA – est qu’il faut protéger les algorithmes finaux au moins autant que les données. Dans notre cas, cela signifie que le fait que telle méthode de traitement soit ou non efficace ne doit pas être révélé, alors que bien souvent la Défense se préoccupe seulement des mesures (en l’occurrence des images). Par comparaison, nous regrettons que les lois de guidage d’un missile se trouvent dans la littérature publique ; elles nous paraissent au moins aussi critiques que les caractéristiques de l’autodirecteur.

Récapitulons donc, sur le cas particulier du traitement de l’image, l’ensemble de la procédure que nous proposons :

- Laisser les universitaires publier tout ce qu’ils veulent sur le sujet, sans restriction aucune, mais suivre leurs travaux (les Industriels le font, pour la Défense c’est moins clair) ;
- Restreindre l’accès aux Centres de Recherche des Industriels et de la Défense. Ceci signifie en particulier que les Industriels doivent être vigilants à propos des formations qu’ils donnent à leurs acheteurs étrangers. Ils doivent donner ces formations en termes d’algorithmes universitaires, et non en termes d’algorithmes spécifiques.

B. Maintenance

Pour le satellite, la maintenance se réduit à une vérification des performances, qui peut se faire à distance, et, éventuellement, à une calibration de certains éléments (par exemple l’horloge). En général, on ne peut pas remplacer les pièces défectueuses, sauf mission spatiale à haut coût. Mais cette vérification et cette calibration restent une véritable maintenance, et elle répond à nos objectifs : elle permet à l’industriel qui la réalise de vérifier que le satellite est bien là où il doit être, qu’il fait bien ce qu’il devrait faire.

La maintenance du segment sol est une maintenance ordinaire, comme on peut la concevoir pour un parc informatique. Il est légitime que, par exemple tous les ans, l’industriel vienne vérifier le bon fonctionnement de ses produits.

C. Obsolescence

Le domaine de l’imagerie satellitaire est en pleine évolution ; il est normal que les industriels proposent souvent des solutions techniquement améliorées. En ce qui concerne les satellites, l’obsolescence est naturelle, car la durée de vie est généralement brève. En ce qui concerne le segment sol, elle s’organise naturellement autour d’algorithmes plus performants, incorporant les progrès constants de l’informatique.

En conclusion, nous voyons que la méthode MMO s’applique extrêmement bien au cas de l’imagerie satellitaire, et qu’elle permet de donner une réponse précise à la question : que devons-nous protéger ?

IX. La sous-traitance scientifique et technique : le vrai danger

On assiste de plus en plus souvent à des « délocalisations » : les usines d'assemblage de produits de haute technologie se situent souvent dans le sud-est asiatique ; on confie à des équipes de programmeurs indiens la réalisation de certains programmes ; on fait appel à des scientifiques russes, à qui on sous-traite certaines études, etc. Ceci n'est en rien propre au secteur spatial, mais touche une large part de l'activité de haute technologie, y compris de défense.

De telles délocalisations, de telles sous-traitances, nous paraissent extrêmement dangereuses, non point pour des raisons de défense, mais parce que les pays concernés risquent fort de devenir nos concurrents commerciaux d'ici dix ou quinze ans.

On ne peut que s'étonner de voir l'absence de stratégie industrielle, même au sein des grands groupes. Alcatel vend des usines, fait procéder à l'assemblage par des sous-traitants étrangers, en annonçant qu'il va se recentrer sur la recherche. Et six mois après, la recherche souffre de coupes sombres dans les budgets. Il n'y a pas de cohérence, pas de réflexion à long terme.

Un certain nombre de pays (Inde, sud-est asiatique) ont une main d'œuvre scientifique de bon niveau, bien formée, en particulier dans les universités occidentales. Ils sont tout à fait capables de nous concurrencer, si on leur en fournit l'opportunité, et ils le font déjà dans de très nombreux secteurs (pratiquement tous les appareils électroniques grand public sont assemblées en Chine, en Corée du sud, etc.).

Cette délocalisation ne présente que peu de dangers si on se limite à l'assemblage des appareils : on leur envoie les pièces séparément, et des ouvriers peu qualifiés les fixent ensemble. Il y a une économie pour l'industriel, du fait du faible coût de la main d'œuvre peu qualifiée.

Elle présente au contraire des dangers considérables s'il s'agit d'une tâche à forte intelligence ajoutée, comme une tâche de recherche ou une tâche de programmation. Rédiger un programme correctement est tout un art, et nous avons grand tort de laisser les Indiens maîtriser cet art à notre place. Il y a là un danger considérable pour notre économie, sans parler évidemment de la présence de possibles « chevaux de Troie » dans les programmes.

Dans les domaines qui sont soumis à des autorisations d'exportation, nous suggérons donc fermement que l'Etat prenne toute disposition pour vérifier qu'aucune « pièce » du programme visé par l'exportation n'a été sous-traitée à l'étranger ; si c'est le cas, l'autorisation d'exportation devrait être refusée. On a là un moyen très simple de contraindre les industriels.

Par exemple, l'Etat devrait refuser l'autorisation d'exportation d'un système spatial s'il s'avère que la recherche sur les algorithmes de traitement de l'image a été confiée à des Russes, la programmation à des Indiens, etc.

Sortons un peu du cadre de cette étude, et voyons ces délocalisations scientifiques et techniques sous un point de vue un peu plus large. On dit qu'elles permettent aux industriels de réaliser des économies en charges sociales. Sans doute, à court terme. Mais à court terme, à moyen terme comme à long terme, elles coûtent cher au pays, et

sont globalement très négatives pour l'économie, parce que nous avons quantité de scientifiques au chômage, qu'il faut indemniser pendant que les Indiens travaillent.

Il n'est pas exact qu'on manque d'informaticiens : c'est un mythe qu'eux-mêmes ont répandu. Mais il est exact qu'ils sont souvent surpayés. Il y a environ 10 000 scientifiques français, docteurs es-sciences, au chômage ou vivant de « petits boulots ». Le vrai problème est une mauvaise formation, une mauvaise adéquation entre l'offre et la demande : les jeunes docteurs ont une formation trop académique qui ne correspond pas aux besoins des entreprises. Mais ceci peut être corrigé. Les industriels ne s'en soucient pas et ne voient que le court terme. L'Etat pourrait intervenir, en faisant en sorte que le coût des scientifiques français soit plus attractif pour les entreprises (cela peut consister en une formation complémentaire, des dégrèvements de charges, etc.). La situation actuelle est totalement absurde.

Cinquième partie

Analyses spécifiques relatives aux éléments scientifiques et technologiques

Dans les Parties I à III, nous avons défini une méthodologie permettant le contrôle des exportations ; dans la Partie IV, nous avons montré comment la mettre en œuvre sur un système d'observation par satellite.

Nous allons maintenant passer en revue, de manière plus technique, un certain nombre de domaines scientifiques directement utilisés dans les systèmes spatiaux.

En ce qui concerne la prolifération, la question est réglée par une application de la méthode MMO : réaliser des boîtes noires (Miniaturisation), vérifier périodiquement qu'elles sont en bon état (Maintenance) et gérer leur remplacement (Obsolescence).

En ce qui concerne les exportations, nous avons clairement défini la précaution à prendre dans la Partie IV : on peut laisser sans danger accès aux recherches universitaires, mais il faut protéger la mise en œuvre concrète. Parmi les centaines d'algorithmes explorés par la recherche fondamentale, il faut protéger « le bon », c'est à dire celui qui, moyennant modifications, s'est révélé utilisable. Et il ne faut surtout pas dire que les autres sont mauvais, ni pourquoi ! Nous verrons ceci plus en détail sur des exemples.

I. Trajectographie et positionnement

Pour un satellite, ces problèmes se décomposent en deux étapes : trajectographie du lanceur et trajectographie du satellite.

Dans l'état actuel des choses, y compris pour des satellites militaires, ni la trajectographie ni le positionnement ne sont critiques, que ce soit pour le lanceur ou pour le satellite lui-même.

Il faut ici distinguer deux choses : la précision de la trajectographie elle-même (où se trouve exactement le satellite ?) et la connaissance qu'on en a (avec quelle précision cette trajectoire est-elle connue ?).

La trajectographie assignée au satellite n'est généralement pas critique : c'est évident pour des satellites de communication, également pour des satellites d'observation, qui couvrent de larges zones. Pour des satellites de type positionnement (GPS ou le futur Galileo), il y a des contraintes sur la constellation de satellites : ils doivent couvrir la Terre sous certains angles, un nombre minimal doit être visible, etc. Mais ceci ne se traduit pas par des contraintes précises sur leur trajectoire, du moins pas à la centaine de mètres près.

La trajectographie restituée pour le satellite (la connaissance qu'on en a) n'est pas critique pour les satellites d'observation optique et de communications. Elle est par contre extrêmement critique pour les satellites de positionnement, dont l'orbite doit être connue avec une très grande précision (de l'ordre du millimètre). Elle est également critique pour des satellites d'observation radar, de type « Topex-Poséidon », capables de mesurer la hauteur de la mer : il faut évidemment une information fiable sur la trajectoire elle-même.

Prenons spécifiquement le cas du GPS, ou de Galileo. Trois axes de recherche se dégagent :

A. Bien connaître la position précise des satellites (où sont-ils vraiment, à chaque instant ?)

Cette recherche inclut la prise en compte de nombreuses corrections, qui relèvent de la physique de haut niveau : correction relativiste, correction du champ magnétique terrestre, corrections dues à la troposphère (couche basse de l'atmosphère terrestre, dont l'épaisseur varie de 8 à 17 km entre le pôle et l'équateur), corrections dues à l'humidité, etc.

B. Améliorer le calcul du positionnement du mobile à partir des indications fournies par le satellite

Les logiciels du commerce fournissent un positionnement instantané, à quelques dizaines de mètres près, mais des techniques existent (GPS Différentiel) qui permettent d'améliorer le résultat par calcul. Ces calculs sont plus ou moins longs et plus ou moins précis, mais des calculs longs et sophistiqués permettent une précision millimétrique (utile en particulier en géodésie). La recherche sur ces questions est très active.

C. Améliorer globalement l'information de position du mobile, en y incluant les données fournies par les satellites

En particulier dans les applications militaires, on ne se contente pas du positionnement GPS ; on le « fusionne » avec d'autres sources d'informations, notamment celles fournies par les centrales à inertie. Le GPS est normalement plus précis, mais on cherche à le rendre ainsi plus fiable, à s'affranchir des dépendances, et surtout à éviter les brouillages (les signaux GPS, très faibles, sont très sensibles aux brouillages). La recherche de Défense est très active sur tous ces points, notamment l'« hybridation » entre le GPS et les autres systèmes de positionnement.

D. Quels sont les points à protéger ?

La connaissance des modèles de champ magnétique, d'atmosphère, de météorologie, de climat, et plus généralement de tout ce qui touche au « géoïde » (la Terre) est fournie par des organismes internationaux, et l'accès aux informations est généralement public. Ces informations sont très difficiles à exploiter et elles requièrent un niveau de spécialisation extrêmement élevé.

Des cours sont organisés par différents organismes : IGN, Météo France, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, diverses universités. Nous considérons (fidèles aux descriptions données à la Partie IV) qu'il n'y a pas lieu d'apporter de restriction au contenu de tels enseignements, mais qu'il faudrait leur prêter une attention, d'ordre général, au travers de la question : peuvent-ils concerner nos intérêts commerciaux ou de défense ? Notre sentiment est que le positionnement ultra-précis (millimétrique) est de peu d'intérêt pour la Défense, et que le positionnement usuel (métrique) a ses applications commerciales déjà couvertes par le GPS, au travers des récepteurs usuels. Nous sommes très sceptiques quant aux applications commerciales et à la rentabilité du futur système Galileo, mais ceci sort du cadre de la présente étude.

Les algorithmes permettant d'améliorer le temps de calcul pour le positionnement précis (GPS différentiel) font l'objet de recherches actives (LAREG, ONERA, LCPC, diverses universités). Nous adopterons la même position : laisser se développer la recherche universitaire, mais ne pas révéler quels algorithmes sont utilisés en pratique.

Enfin, le point qui nous paraît le plus critique est celui qui relève de l'utilisation militaire du GPS : hybridation avec d'autres systèmes, résistance au brouillage. Les systèmes existants relèvent de l'information protégée, et leur interaction avec le GPS le sera aussi. La recherche sur ces questions sera évidemment protégée.

Nous voyons clairement ici une mise en œuvre concrète des idées que nous avons déjà présentées auparavant : ce n'est pas la recherche sur les algorithmes sophistiqués qu'il faut protéger, celle qui permettrait une précision plus grande ou un temps de calcul plus faible. Cette recherche est de peu d'intérêt stratégique (quasiment nul en ce qui concerne la Défense, et très discutable en ce qui concerne l'aspect commercial). Celle qu'il faut protéger, c'est celle qui caractérise l'interaction avec des systèmes déjà opérationnels et aussi celle qui permet de rendre les systèmes existants plus robustes (résistance au brouillage, en particulier). C'est la mise en œuvre opérationnelle qu'il faut protéger, et non pas les algorithmes académiques.

E. Un exemple : la cartographie

Le système GPS a permis une refonte à peu près complète de la cartographie mondiale. Jadis réalisée, selon des systèmes divers, par chaque pays en ce qui le concerne, elle est maintenant réalisée globalement à partir d'informations satellitaires, selon un standard unique, beaucoup plus précis.

Les cartes détaillées étaient jadis considérées comme relevant de l'information protégée (surtout en Union Soviétique, bien sûr) ; elles procuraient un avantage militaire réel. La connaissance des équipements, concentrations de forces, etc., était utile du temps de la guerre froide ; elle ne l'est plus de la même façon aujourd'hui. Certes, nous souhaitons avoir une information détaillée sur les pays où nos forces sont susceptibles d'intervenir, mais nous ne voyons pas d'inconvénient à ce que ces mêmes pays aient cette même information en ce qui nous concerne : le besoin de Défense, concernant la protection de la cartographie, a évolué. Pour la France, des cartes détaillées au 25 000ème sont disponibles à la vente (IGN). On dispose même de Modèles Numériques de Terrain, en accès libre, pour une large partie du globe (les MNT incluent des informations de relief, d'altitude : c'est en quelque sorte une représentation 3d du terrain, qui peut être utile pour des simulations, aussi bien que pour des opérations militaires).

Pour la cartographie, l'essentiel du marché est aujourd'hui civil (équipements divers, voiries, ramassage des déchets, etc.). Les besoins sont tels qu'il serait absurde et inutile de vouloir restreindre l'accès libre aux résultats produits par ces technologies. Il est par contre utile de vouloir « gérer le gap technologique » avec d'autres pays : réduire notre retard sur les USA, conserver notre avance par rapport à d'autres pays.

II. Orientation, guidage, navigation, rendez-vous en orbite

Les technologies spatiales incluent un certain nombre de domaines scientifiques qui ont pour objet de s'assurer de la précision de la position du satellite ou du missile.

L'orientation du satellite se réfère aux divers angles qui caractérisent sa position dans un référentiel lié aux étoiles, quelle que soit la position. Le guidage et la navigation concernent l'aptitude à respecter une trajectoire donnée.

L'orientation du satellite n'est en général pas critique, du moins lorsqu'il s'agit de satellites de communication ou d'observation. Elle le deviendrait en particulier pour un satellite « de combat », portant par exemple un laser de puissance : nous en parlons plus bas.

Les lois de guidage et navigation sont, pour un satellite, beaucoup plus faciles à contrôler que pour un missile : les durées sont beaucoup plus longues et les temps de réaction aussi. Un satellite est beaucoup plus loin ; il n'a pas la même réactivité, la même agilité, qu'un missile. Les corrections de trajectoire sont plus lentes. Dans leur principe, elles ne présentent pas de difficulté : il s'agit de petits jets, que l'on met en œuvre dans une direction donnée pour modifier l'orbite du satellite.

Cependant, là encore, tout est dans l'art de l'ingénieur : selon la manière dont seront faites les corrections d'orbites, brutales ou intelligentes, la longévité du satellite sera réduite ou accrue. Il y a une « gestion » de l'orbite, utilisant la mécanique spatiale (attraction d'autres astres), qui représente un savoir-faire : il n'est pas utile de le divulguer. Ceci concerne tous les aspects du déplacement du satellite, y compris bien sûr les rendez-vous en orbite.

En ce qui concerne les missiles, nous nous limitons ici aux missiles balistiques, qui sont les seuls concernés par les technologies spatiales. Ces missiles étant une composante de notre dissuasion nucléaire, la précision terminale n'est pas spécifiquement recherchée : elle est de l'ordre de la centaine de mètres. Une précision plus grande serait sans objet : on met davantage l'accent sur la vitesse, qui permet d'échapper à la défense adverse, et sur la présence de contre-mesures, au sein d'un « cortège ».

La précision de la trajectographie n'est pas non plus recherchée. Les essais sont faits par le Bâtiment d'Essais et de Mesure « Monge », qui appartient conjointement à la Marine et à la DGA. Ce Bâtiment est en charge de la trajectographie du cortège balistique lors des essais, mais il ne connaît sa propre position, grâce au GPS, qu'à une dizaine de mètres près. Un programme de rénovation est en cours, pour améliorer cette connaissance de la position propre du navire, mais en vue surtout d'utilisations civiles. Pour le cortège balistique, la connaissance précise de la position n'est pas critique.

La connaissance précise de la position devient critique pour des missiles de type « frappe chirurgicale », mais il ne s'agit plus de technologies spatiales.

III. Précision de visée

Il y a une confusion, dans l'esprit du public, créée et entretenue par des films d'espionnage. En réalité, les satellites sont très peu adaptés à des tâches requérant une précision d'observation ou de visée, comme par exemple la lecture d'une plaque minéralogique de véhicule.

Les satellites géostationnaires (immobiles au dessus d'un point donné) sont beaucoup trop hauts pour voir quoi que ce soit en détail. Pour observer des détails, il faut un satellite en orbite basse. Mais alors les lois de la physique font que le satellite doit

tourner rapidement, et ne restera que quelques minutes (voire moins) au dessus d'une zone donnée. Il faudrait donc que le véhicule dont on veut lire la plaque d'immatriculation ait le bon goût de se trouver au bon endroit au bon moment, ou bien que l'on dispose d'un énorme réseau de satellites.

Même ainsi, l'observation n'est pas garantie. Tout d'abord, il faut une résolution de quelques centimètres (à la limite de ce que l'on sait faire aujourd'hui), avec des conditions d'observation satisfaisantes : luminosité suffisante, pas de nuages, pas de poussières, pas de brouillard, etc.

L'observation précise n'est donc pas, assez naturellement, une tâche pour les satellites. Il vaudra mieux envoyer un avion, un hélicoptère ou un drone, beaucoup moins coûteux et beaucoup plus flexibles.

Reste le cas de la précision de visée requise par des armes à bord du satellite (lasers de puissance) : nous en parlons plus bas.

IV. Crédibilité

Nous avons vu plus haut que la crédibilité, de manière générale, des systèmes d'observation par satellite n'était pas assurée : les performances ne sont pas à la hauteur des attentes des clients. Il s'agit pourtant de systèmes existant réellement (ce ne sont ni des projets, ni des prototypes), et fonctionnant dans des conditions normales (pas de brouillage ni de contre-mesures).

Nous allons maintenant nous intéresser à l'utilisation militaire de l'espace, non plus seulement au travers de systèmes d'observation ou de communication. Il s'agit maintenant de systèmes de défense (ou même d'attaque) comportant des lasers de puissance à bord des satellites : c'est typiquement le cas du système NMD américain.

Deux systèmes distincts sont en projet :

- Un réseau de satellites (20 à 25 satellites), chacun équipé d'un laser de puissance, susceptible de détruire un missile balistique au cours de sa phase d'envol.
- Une barrière anti-missile, susceptible d'arrêter une attaque de missiles balistiques, lorsqu'ils sont au dessus du territoire américain, ou à proximité ;

A. Réseau de satellites-laser

La capacité d'un laser en orbite de détruire une cible de quelques centimètres située à des milliers de km n'a pas été démontrée et elle pose problème. On peut certainement admettre que la localisation de la cible soit faite de manière très précise par un réseau de radars (y compris des radars situés sur des navires à proximité), mais le tir ne se fait pas en ligne droite, du fait des irrégularités de densité de l'atmosphère. Ceci peut être corrigé (et la correction est prévue), mais pour qu'elle soit effective, il faudrait avoir une connaissance précise de l'état de l'atmosphère sur tout le trajet, connaissance qui n'est pas disponible, faute d'un nombre suffisant de capteurs.

Rappelons que la correction due à la troposphère (couche basse de l'atmosphère) est nécessaire pour le GPS, en positionnement précis.

Le laser n'a pas la possibilité de savoir s'il a ou non touché sa cible : elle est désignée et on tire. On peut évidemment, si le tir a échoué, en refaire un autre avec une nouvelle désignation d'objectif, mais cela prend du temps. On estime à 0,5 seconde à 1 seconde le laps de temps nécessaire pour changer d'objectif, ou pour recalculer un objectif. Par ailleurs, le tir lui-même n'est pas instantané : il faut une ou deux secondes pour que le missile soit détruit (c'est la chaleur du laser qui le détruit, en faisant fondre l'enveloppe métallique).

Au total, on constate que si chaque missile doit être visé trois ou quatre fois, la vingtaine de satellites sera tout à fait incapable de détruire un nombre équivalent de missiles.

Il faut en outre signaler que la charge en énergie disponible sur chaque satellite est très limitée : quelques dizaines ou centaines de coups. Un pays inamical trouverait facilement un moyen de contourner une telle défense : il suffit de lancer un grand nombre de missiles (y compris des leurres), en même temps ou consécutivement, pour saturer la défense.

Cette réflexion s'applique à n'importe quelle visée de précision à grande distance. On a tendance (comme le dit E. Luttwak) à prêter à la technologie des vertus qu'elle n'a pas, et les performances réelles, sur le champ de bataille, se révèlent très inférieures aux attentes.

B. Les missiles contre-missiles

Il s'agit ici d'une interception tardive, par un missile qui va à la rencontre du missile assaillant. Là encore, on peut admettre que la trajectographie de l'assaillant ait été correctement acquise et qu'une identification claire ait été faite. C'est l'interception elle-même qui pose problème. Même contre un missile adverse peu manœuvrant et dépourvu de contre-mesures, les essais d'interception n'ont pas tous été concluants. Le véritable problème est ailleurs :

- Le missile assaillant peut larguer des têtes multiples et des leurres, en nombre tel que le missile défenseur sera neutralisé, à deux niveaux : 1) son système de détection (radar ou infra rouge) sera saturé, et 2) même s'il parvenait à discerner une cible, il ne saurait pas laquelle choisir.
- Le missile assaillant peut être doté une agilité telle que le missile défenseur ne pourra pas suivre. Le missile assaillant peut très facilement avoir, lui aussi, par radar interne, une information sur la proximité du missile défenseur, auquel cas il décide de faire une dérobade. Le missile défenseur ne pourra pas suivre, car pour lui l'information est trop tardive (il y a un certain laps de temps, appelé « constante de temps du missile », entre l'instant où l'information est reçue et l'instant où le missile change sa trajectoire : de l'ordre de 0,3 seconde en général). Les missiles balistiques ne sont pas normalement conçus pour changer de trajectoire brusquement, mais rien n'empêche des têtes, lancées par le missile lui-même, d'être manœuvrantes.

Le déploiement d'un bouclier de missiles anti-missiles donnerait certainement lieu à des recherches dans cette direction : têtes multiples et manoeuvrantes, issues d'un même missile balistique, et environnées de leurres.

Le même argument s'applique, comme précédemment : il ne s'agit plus de visée précise, mais d'interception précise, et l'interception précise est aussi hypothétique, en pratique, que la visée précise.

La meilleure stratégie à adopter, à la fois sur le plan militaire (efficacité) et sur le plan économique (coût) reste la dissuasion nucléaire. Elle répond tout à fait à la menace constituée par un pays inamical lançant des missiles balistiques : nos avions comme nos sous-marins ont une portée suffisante. Elle est propre, peu coûteuse (nous l'avons déjà : il suffit de la maintenir) et la prolifération est très bien contrôlée.

Références :

1. Lasers in space technological options for enhancing us military capabilities, by Mark E. Rogers, Lieutenant Colonel, USAF, November 1997, Occasional Paper No. 2 Center for Strategy and Technology Air War College Maxwell Air Force Base, Alabama, USA.
2. Lasers and Missile Defense: new concepts for space-based and ground-based laser weapons, by William H. Possel, Lt Col, USAF, July 1998, Occasional Paper No. 5, Center for Strategy and Technology, Air War College, Air University, Maxwell Air Force Base, Alabama, USA.
3. Laser Options for National Missile Defense, Steven G. Leonard ; Mark L. Devirgilio (Faculty Advisor) *Air Command and Staff College* 1998.

Annexe

La dimension économique de l'espace militaire

Documents communiqués par Euroconsult