

**3** | Manuel d'annexe du régime de commande de technologie de missile (MTCR) - 2017

Catégorie II - Article 4:  
Propergol, produits  
chimiques et production de  
propergol

## Catégorie II - Article 4: Propergol, produits chimiques et production de propergol

### 4.A. Équipement, assemblages et composants

Aucune.

### 4.B. Équipement d'essai et de production

4.B.1. «Équipement de production» et composants spécialement conçus pour cet équipement, pour la «production» la manipulation ou les essais de qualification de propergols liquides ou de constituants de propergols mentionnés par l'article 4.C.

- |                          |                       |
|--------------------------|-----------------------|
| •Argentine               | •Australie            |
| •Autriche                | •Belgique             |
| •Brésil                  | •Bulgarie             |
| •Canada                  | •Chine                |
| •République Tchèque      | •Égypte               |
| •Finlande                | •France               |
| •Allemagne               | •Grèce                |
| •Inde                    | •Iran                 |
| •Israël                  | •Japon                |
| •Corée du Nord           | •Pakistan             |
| •Pologne                 | •Fédération de Russie |
| •République de Slovaquie | •Afrique du Sud       |
| •République de Corée     | •Espagne              |
| •Suède                   | •Ukraine              |
| •Royaume Uni             | •États-Unis           |

Production  
globale



**Nature et But:** Les composants individuels de l'équipement de production de propergol liquide sont communs à toute installation de distillation de pétrole ou à toute grande usine chimique. Les composants typiques comprennent les cuves de réacteur, les condensateurs, les colonnes de récupération, les appareils de chauffage, les évaporateurs, les ensembles de filtres, les décanteurs, les refroidisseurs, les séparateurs gazeux, et les pompes centrifuges. Aucun de ces composants n'est spécialement conçu pour la fabrication de propergols liquides. Toutefois, lorsqu'elle est combinée à une installation de production de propergols, cette installation est généralement optimisée pour la production d'un propergol particulier et inapte à fabriquer toute autre substance.

Les technologies de fabrication des propergols liquides sont généralement bien connues, bien que diverses entreprises puissent avoir des procédures exclusives pour optimiser le rendement, réduire les coûts ou trouver d'autres utilisations pour les sous-produits.

Les essais d'acceptation des propergols liquides nécessitent de l'équipement analytique commun à la plupart des laboratoires de contrôle de la qualité chimique, y compris de l'équipement comme les chromatographes en phase gazeuse, les spectromètres d'absorption atomique, les spectromètres infrarouges et les calorimètres de bombes. Cet équipement peut généralement être utilisé sans modification pour analyser les propergols liquides de fusées en vue de leur acceptation.

**Mode de fonctionnement:** Les méthodes de production spécifiques dépendent du propergol fabriqué. Bon nombre des constituants utilisés dans les propergols liquides sont couramment produits à des fins commerciales, mais nécessitent un traitement supplémentaire pour purifier, stabiliser, inhiber ou mélanger afin d'obtenir certaines propriétés. Par exemple, l'acide sulfurique ou le carbonate de magnésium est utilisé pour purifier l'acide nitrique. L'acide nitrique commercial, habituellement combiné à de l'eau sous forme d'hydrate, ne contient que 55 à 70 % d'acide. Un traitement chimique est nécessaire pour briser les hydrates et produire de l'acide nitrique anhydre (sans eau) pur de 97 % à 99 %. Pour former de l'acide nitrique fumant rouge inhibé (IRFNA), du  $N_2O_4$  est ajouté à l'acide nitrique concentré pour le stabiliser contre la décomposition rapide, et des traces de fluorure d'hydrogène (HF) sont ajoutées pour réduire la corrosion des récipients.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La production de propergol liquide et l'équipement d'essai de réception sont nécessaires pour développer une capacité locale à fabriquer des propergols.

**Autres usages:** L'équipement et les technologies sont d'usage courant et largement répandus dans les industries de production pétrolière et chimique.

**Aspect (sortie d'usine)** En général, les installations complètes de fabrication de propergols liquides ne sont pas achetées et transférées en une seule pièce; elles sont assemblées à partir de nombreuses pièces courantes d'équipement de traitement chimique et industriel. À moins qu'une usine clé en main ne soit expédiée, les articles les plus susceptibles d'être rencontrés sont probablement les plans, les dessins, les calculs et les listes d'équipement associés à la conception d'une usine. Il existe même des logiciels disponibles sur le marché qui aident les ingénieurs chimistes à concevoir de telles installations.

**Aspect (à l'emballage):** La taille de l'équipement de fabrication de propergol liquide détermine l'emballage. Les machines plus petites sont mises en caisse dans des conteneurs amortisseurs ou attachées à des palettes rembourrées isolées des autres emballages. Les machines plus grandes sont démontées pour l'expédition et remontées sur place et leurs composants sont emballés séparément dans des caisses ou des palettes.



4.B.2. «Équipement de production», autre que celui mentionné par l'article 4.B.3, et composants spécialement conçus pour cet équipement, pour la production, la manipulation, le mélange, la polymérisation, le moulage, l'emboutissage, l'usinage, l'extrusion ou les essais de réception des propergols liquides ou de leurs constituants mentionnés par l'article 4.C.



Schéma 48: Un mandrin de moulage de propergol. (ATK)

**Nature et But:** L'équipement et l'infrastructure de production nécessaires à la production de propergol solide pour fusée sont complexes et spécialisés. Les installations et l'équipement sont nécessaires pour préparer les divers ingrédients du propergol, mélanger et manipuler le propergol, couler et durcir le propergol à l'intérieur de l'enveloppe moteur, et autres opérations spécialisées comme le pressage, l'usinage, l'extrusion, et les essais de réception.

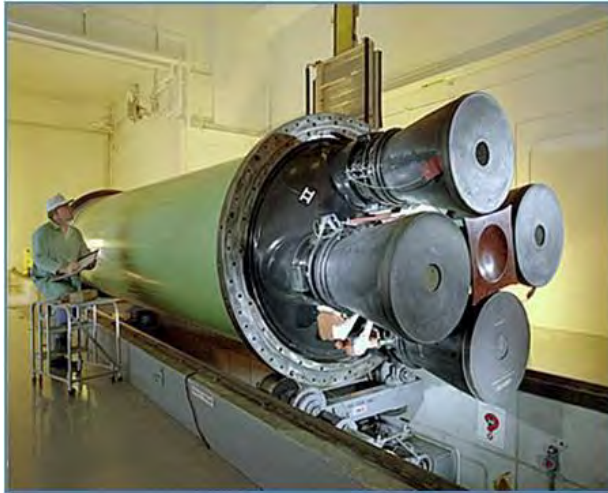
**Mode de fonctionnement:** Le propergol solide est produit par l'un des deux procédés suivants, soit par mélange en lots, soit en mélange continu. La plupart

des programmes de missiles utilisent le procédé par lots pour fabriquer du propergol solide pour moteurs fusée. Après réception et acceptation des différents ingrédients, le perchlorate d'ammonium (AP) est généralement broyé dans un broyeur à énergie fluide pour obtenir la taille de particules requise. Tous les ingrédients, y compris le liant, l'AP, la poudre métallique, les stabilisants, les agents de durcissement et les modificateurs du taux de combustion, sont mélangés dans de grands mélangeurs pour former une suspension visqueuse. La bouillie de propergol est versée ou coulée dans le carter du moteur-fusée (figure 49), dans lequel un mandrin (voir figure 48) crée une chambre creuse qui descend au centre du moteur. L'enveloppe du moteur chargé est placée dans un grand four pour vulcaniser le propergol. Pendant le durcissement, la bouillie est transformée en un matériau caoutchouteux dur appelé grain de propergol. Le moteur-fusée avec le propergol durci est ensuite refroidi, le mandrin est enlevé et toutes les opérations de finition ou d'usinage sont terminées. Les moteurs finis sont habituellement radiographiés (Figure 50) pour s'assurer que le grain du propergol est homogène, lié partout sur le boîtier et exempt de fissures. D'autres méthodes d'essais non destructifs (END), telles que l'écho impulsionnel par ultrasons à faisceau longitudinal, peuvent être utilisées pour vérifier l'intégrité de la ligne de collage entre le boîtier et la couche isolante.



Schéma 49: Le propergol solide sous forme liquide est versé dans des enveloppes de fusée et coulé dans la forme requise. La coulée est déplacée par un support hydraulique pour éliminer les bulles ou autres défauts. (ATK)

Dans le mélange en continu, les mêmes ingrédients propulseurs sont mesurés en continu dans une chambre de mélange, mélangés et déchargés en continu dans le moteur ou un autre conteneur jusqu'à ce que la quantité requise de propergol ait été obtenue. Ce type de mélange est délicat car il est difficile de mesurer avec précision de petites quantités de certains ingrédients, comme les agents de vulcanisation nécessaires à certains mélanges de propergols. Le mélange en continu n'est donc pas utilisé dans une si large proportion.



**Schéma 50: Moteurs finis radiographiés pour assurer l'homogénéité du grain du propergol, son adhérence au boîtier et l'absence de fissures et autres imperfections. (ATK)**

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les propergols solides de meilleure qualité améliorent la portée et la capacité de charge utile des missiles. Un pays a besoin d'équipement de production de propergol solide et d'équipement d'essai de réception pour se doter d'une capacité locale de production de propergol pour les missiles à moteurs-fusées.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine):** Des dispositifs spécialisés sont utilisés pour couler le propergol en créant un vide qui élimine l'air du propergol lorsqu'il est versé dans l'enveloppe du moteur-fusée. La taille de ces dispositifs varie en fonction de la taille des moteurs fusée, mais les principes de fonctionnement sont les mêmes. L'équipement et le procédé pour un petit moteur sont illustrés à la figure 4. Le propergol mélangé est versé du réservoir de mélange dans un grand entonnoir de coulée qui est fixé au moteur-fusée. Une grande valve dans le col de l'entonnoir de coulée isole le moteur dans le vide des conditions atmosphériques ambiantes. Une fois que l'entonnoir de coulée est plein de propergol, la soupape s'ouvre lentement pour permettre au propergol de s'écouler

dans l'enveloppe du moteur-fusée. Les moteurs sont parfois coulés dans une fosse de coulée/cure, qui est une structure souterraine en béton revêtue de serpentins chauffants. Toute la fosse est évacuée avant le début des opérations de coulée. Comme c'est le cas pour d'autres équipements de propulsion spécialisés, l'équipement de coulée est généralement construit sur place; sa taille dépend de la taille du moteur et de la façon dont l'opération de coulée est effectuée.



**Schéma 51: Équipement de mélange de bouillie à double-base pour un petit moteur. (British Aerospace Limited)**

- Argentine
- Brésil
- Chine
- Finlande
- Allemagne
- Iran
- Israël
- Japon
- Pakistan
- Afrique du Sud
- Espagne
- Suisse
- Ukraine
- États-Unis
- Belgique
- Canada
- Égypte
- France
- Inde
- Irlande
- Italie
- Pays-Bas
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Suède
- Syrie
- Royaume Uni

Production  
globale



L'équipement de polymérisation varie en taille, allant des grands fours chauffés à l'électricité ou à la vapeur aux grands bâtiments chauffés. Cet équipement n'est pas particulièrement spécialisé car le procédé est simple, il suffit d'augmenter la température du moteur pendant un certain temps. Les grandes fosses de coulée et de vulcanisation sont des installations permanentes sur place.

L'équipement utilisé pour les essais d'acceptation d'un lot de propergol est identique à l'équipement utilisé dans un laboratoire de chimie analytique ou d'essai des matériaux. Cet équipement est utilisé pour effectuer des essais chimiques afin de vérifier la composition, pour brûler de petites quantités de propergol ou pour tester des moteurs de sous-échelle afin de vérifier la vitesse de combustion, et pour effectuer des essais de tension pour vérifier que le propergol a les propriétés physiques requises par le moteur fusée.

L'usinage des surfaces de propergol solide est généralement effectué par de grandes machines de coupe spécialement modifiées pour tenir compte des risques pour la sécurité associés aux propergols

solides. Un grand nombre de ces types de machines sont construits spécialement pour un moteur fusée particulier.

Les grains de propergol solide pour les gros moteurs fusée d'intérêt sont généralement trop gros pour être manipulés directement par une extrudeuse. Toutefois, certains propergols d'intérêt pour le RCTM sont extrudés au cours d'une étape de traitement préliminaire. L'extrusion est généralement limitée aux grains de propergol de moins de 0,3 m de diamètre et s'applique davantage aux missiles air-air, surface-air et air-sol tactiques.

**Aspect (à l'emballage):** La taille de l'équipement de fabrication de propergol solide détermine l'emballage. Les machines plus petites sont mises en caisse dans des conteneurs amortisseurs ou attachées à des palettes rembourrées. Les machines plus grandes sont démontées pour l'expédition et remontées sur place. Leurs composants sont emballés séparément dans des caisses ou sur des palettes.

4.B.3. Équipement comme suit et composants spécialement conçus pour cet équipement:  
 a. Mélangeurs par lots avec possibilité de mélanger sous vide dans la fourchette de zéro à 13,326 kPa et avec contrôle de température de la chambre de mélange et présentant toutes les caractéristiques suivantes:

1. Une capacité volumétrique totale supérieure ou égale à 110 litres; et
2. Au moins un bras à mélanger/pétrir excentré;

**Note:**

*Au point 4.B.3.a.2., l'expression "arbre de malaxage/pétrissage" ne vise pas les désagglomérateurs ni les broches-couteaux.*

b. Mélangeurs en continu avec possibilité de mélanger sous vide dans la fourchette allant de zéro à 13,326 kPa et avec une capacité de contrôle de la température de la chambre de mélange et présentant l'une des caractéristiques suivantes:

1. Deux ou plus de deux bras à mélanger/pétrir; ou
2. Un seul arbre rotatif qui oscille et ayant des dents/broches de pétrissage sur l'arbre ainsi qu'à l'intérieur de l'enveloppe de la chambre de mélange;

- Argentine
- Chine
- Allemagne
- Iran
- Japon
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

- Brésil
- France
- Inde
- Israël
- Pakistan

Production globale



**Nature et But:** Les mélangeurs de lots sont des mélangeurs puissants pour des quantités de lots de matières très visqueuses. Elles sont dérivées de machines utilisées pour mélanger la pâte à pain. Leur but est de mélanger des liquides et des poudres de densités différentes en un mélange uniforme.

Les mélangeurs en continu sont des mélangeurs puissants qui fonctionnent en continu. Ils mélangent de plus grandes quantités que les mélangeurs par lots pour une production à grand volume.

**Mode de fonctionnement:** Les mélangeurs par lots fonctionnent un peu comme un batteur électrique domestique. Le bol contient les ingrédients qui peuvent être ajoutés dans l'ordre pendant que les lames tournantes mélangent le tout. Le contrôle de la température et le vide sont maintenus en entourant la cuve d'une chemise d'eau et en recouvrant la cuve d'un couvercle scellé (Figure 52).

Les mélangeurs en continu alimentent progressivement tous les ingrédients simultanément dans leurs proportions correctes à travers la zone de mélange. Les arbres de malaxage/pétrissage mélangent soigneusement le flux continu de liquides et de poudres, et le mélange uniforme est progressivement déchargé du grand tuyau dans un flux visqueux régulier.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les mélangeurs par lots et en continu sont utilisés pour mélanger des quantités précises de constituants propulsifs liquides et en poudre dans un mélange très uniforme. Ce mélange brûlera violemment s'il est mis à feu,





Schéma 52: Une cuve de mélange de propergol de 420 gallons. (ATK)

les procédures de sécurité sont donc essentielles. Le mélange produit est ensuite coulé et polymérisé dans un autre procédé pour créer un matériau composite caoutchouteux qui sert de propergol dans un moteur fusée à propergol solide.

**Autres usages:** Des mélangeurs en lots et en continu peuvent être utilisés lorsque la production d'un mélange visqueux est nécessaire. Toutefois, la plupart des applications commerciales ne nécessiteront pas le contrôle de la température et les capacités de vide spécifiés à l'article 4.B.3.

**Aspect (sortie d'usine)** Les composants les plus distinctifs d'un mélangeur par lots sont la cuve de mélange et l'assemblage de la pale de mélange. Les bols mélangeurs sont généralement de 0,75 m à 1,5 m de profondeur et de 1 à 2 m de diamètre, tel qu'illustré à la figure 53, mais ils peuvent être considérablement plus grands pour les mélangeurs de plus de

1 700 l (450 gallons). Ils sont à double paroi; la paroi intérieure est en acier inoxydable poli et la paroi extérieure est généralement en acier laminé à froid, parfois peint. L'espace entre les murs est utilisé pour une chemise de chauffage/refroidissement d'eau chaude/froide. La paroi extérieure est équipée de deux vannes pour le raccordement des tuyaux d'entrée et de sortie d'eau. La cuve est généralement soudée à une plaque rectangulaire en acier épais avec des roues à chaque coin. Les roues peuvent avoir des rainures de sorte que l'assemblage de la cuve peut être placé sur des rails pour faciliter le mouvement.

Parfois, le bord supérieur de la cuve est une surface plane usinée avec une grande rainure pour recevoir un joint torique (joint torique); d'autres fois, la tête du mélangeur est munie d'une ou plusieurs de ces rainures. Le but du joint torique est d'assurer l'étanchéité pendant que le mélange est sous vide. L'ensemble de lames se compose de deux ou trois grandes lames, également en acier inoxydable ultra-poli. La plupart des assemblages utilisent des lames à palette torsadée, là où l'une des lames a parfois une ouverture. D'autres assemblages utilisent des lames en forme de vis à liège. Bien que cela ne soit pas évident dans la configuration d'expédition, l'ensemble de lames fonctionne de manière "planétaire", c'est-à-dire que la lame centrale tourne dans une position fixe tandis que les autres une ou deux lames tournent autour de leurs propres axes ainsi qu'autour de la lame centrale fixe. Les autres composants du mélangeur comprennent un moteur électrique, un engrenage, une tête de mélangeur et une structure de support.



Schéma 53: Propergol solide mélangé dans un mélangeur planétaire vertical de 600 gallons. (Thiokol Corp.)

**Aspect (à l'emballage):** Les mélangeurs peuvent être expédiés sous forme d'unités complètes ou de composants. En tant qu'appareils usinés avec précision, les pales du mélangeur sont emballées de manière à les protéger des dommages et de l'environnement d'expédition. Elles sont susceptibles d'être incorporées dans la tête et le cadre du mélangeur et d'être solidement maintenues dans un matériau d'isolation antichoc bloquant pendant le transport. Les cuves de mélange sont des pièces d'équipement lourdes et de grande taille qui sont également susceptibles d'être expédiées dans de grandes caisses en bois solides. Elles sont solidement fixées aux caisses pour éviter de les endommager. Les caisses ont tendance à ne pas avoir de caractéristiques ou de marques distinctives.

## 4.B.3.c. Broyeurs à jet liquide pouvant servir à meuler ou broyer les substances mentionnées par l'article 4.C;

- |                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| •Australie        | •Belgique             |
| •Chine            | •France               |
| •Allemagne        | •Inde                 |
| •Italie           | •Japon                |
| •Luxembourg       | •Pays-Bas             |
| •Nouvelle Zélande | •Fédération de Russie |
| •Afrique du Sud   | •Espagne              |
| •Suède            | •Suisse               |
| •Ukraine          | •Royaume Uni          |
| •États-Unis       |                       |

## Production



**Nature et But:** Les broyeurs à fluide (souvent appelés broyeurs à jet) utilisent de l'air à haute pression ou un gaz inerte pour provoquer l'impact des particules les unes contre les autres. Ces impacts fracturent le matériau en plus petits morceaux jusqu'à l'obtention d'une taille minimale de particules. Les particules de taille inférieure à la taille minimale quittent le broyeur tandis que les particules plus grosses poursuivent le processus de broyage. Le produit fraisé obtenu présente une distribution granulométrique serrée avec une granulométrie typique inférieure à 20 microns. Les tailles de particules de cette gamme ne sont pas faciles à obtenir par des procédés de broyage mécanique dont la limite inférieure est de 44 microns (325 mesh). Les broyeurs à fluide sont également beaucoup plus sûrs pour le broyage de matériaux explosifs tels que HMX et RDX.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les broyeurs d'énergie fluide produisent des poudres à grains fins AP, HMX ou RDX utilisées comme combustibles ou modificateurs du taux de combustion pour le propergol solide des fusées.

**Autres usages:** Les usines d'énergie fluide sont également utilisées dans les industries alimentaire, pharmaceutique, minière et des pigments pour peinture.

**Aspect (sortie d'usine)** Les broyeurs à fluide sont des appareils extrêmement simples, sans pièces mobiles. La plupart sont des appareils plats et cylindriques en acier inoxydable mesurant de 7 cm à 10 cm de hauteur et de 7 cm à 40 cm de diamètre. Ils disposent d'un orifice d'entrée et d'un orifice de sortie pour la fixation d'équipements auxiliaires tels que des trémies d'alimentation en matériau, des entrées de gaz et des cyclones de séparation du produit qui enlèvent le produit fraisé du flux gazeux.

**Aspect (à l'emballage):** Les usines d'énergie hydraulique (figure 54) sont généralement expédiées dans des caisses en bois avec de la mousse ou des matériaux d'emballage utilisés pour les protéger pendant le transport. Les caisses ne sont pas différenciées.



Schéma 54: Exemples de divers broyeurs à jet. (The Jet Pulverizer Company)

4.B.3.d. «Équipement de production» de poudre métallique pouvant servir à la «production», dans un environnement contrôlé, de matières sphériques ou atomisées mentionnées par les articles 4.C.2.c, 4.C.2.d. ou 4.C.2.e.

**Note:**

L'article 4.B.3.d. Comprend:

- a. Les générateurs de plasma (propulseur électrothermiques à arc à haute fréquence) pouvant servir à l'obtention de poudres métalliques déposées par pulvérisation ou sphériques, le processus étant organisé dans un environnement argon-eau;
- b. Les équipements d'électro-explosion pouvant servir à l'obtention de poudres métalliques sphériques ou atomisées, le processus étant organisé dans un environnement argon-eau;
- c. Les équipements pouvant servir à la «production» de poudres d'aluminium sphériques par injection d'une matière fondue dans un support inerte (par exemple l'azote).

**Note:**

1. Les seuls mélangeurs par charge, et en continu, pouvant servir aux propergol solides ou à leurs composants spécifiés dans l'article 4.C., et les broyeurs à jet liquide mentionnés dans l'article 4.B. sont ceux indiqués dans l'article 4.B.3.
2. Les types d'«équipement de production» de poudres métalliques non mentionnés par l'article 4.B.3.d. doivent être évalués en vertu de l'article 4.B.2.

**Mode de fonctionnement:** L'approche la plus courante pour la production de poudres métalliques fines destinées à être utilisées comme constituants dans les propergols de missiles est le procédé de fusion du métal à l'aide de l'équipement spécifié à l'alinéa c de la note au point 4.B.3.d. ci-dessus. Ce procédé (aussi appelé atomisation de gaz) s'échelonne bien et peut être utilisé pour produire de grandes quantités de poudres métalliques de façon rentable. Le générateur de plasma et les méthodes d'électro-érosion sont relativement nouveaux dans l'application et ne sont pas largement utilisés dans les programmes de production. Ils sont actuellement considérés comme des procédés de laboratoire ou de R-D, alors que le procédé du métal en fusion est entièrement développé pour les applications de production à grande échelle.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'équipement de production de poudres métalliques atomisées et sphériques est utilisé pour produire des poudres métalliques à grains fins uniformes utilisées comme constituants dans les propergols solides et liquides. La poudre métallique est utilisée pour améliorer les caractéristiques de performance du moteur. Les métaux en poudre sont cruciaux dans les moteurs à propergol solide à composite

modernes. Les poudres métalliques atomisées et sphériques dans le propergol fournissent une plus grande poussée, ce qui augmente la portée et la capacité de charge utile des missiles.

**Autres usages:** L'équipement de production de poudres métalliques atomisées et sphériques peut être utilisé pour produire des poudres métalliques pour de nombreuses applications commerciales, des pigments dans les peintures métalliques aux matières premières pour les machines de fabrication d'additifs.

**Aspect (sortie d'usine):** L'équipement servant à produire de la poudre métallique sphérique pulvérisée selon la méthode décrite ci-dessus est facilement assemblé à partir d'équipement industriel commun. L'équipement comprend un four pour faire fondre le matériau; un ensemble pulvérisateur/tuyère/creuset qui injecte le métal dans le réservoir; un grand réservoir de refroidissement dans lequel le métal liquide est pulvérisé; une pompe fixée au réservoir pour éliminer l'air; un système de remplissage pour le gaz inerte (par exemple, réservoirs et soupape); une unité de séparation cyclone; un dépoussiéreur et un réservoir pour stocker le produit.

**Aspect (à l'emballage):** L'équipement de production de poudres métalliques pulvérisées n'est pas expédié en une seule unité. Ses composants sont plutôt démontés, emballés et expédiés comme la plupart des équipements industriels. Les pièces plus petites sont emballées ou mises en caisse et fixées sur une palette. Le réservoir est emballé dans une boîte pour le protéger des bosses. Les tuyères de pulvérisation sont emballées séparément dans des boîtes protégées.

## 4.C. Matériaux

### 4.C.1. Propergols composites et propergols composites à double base modifiée

**Nature et But:** Les propergols composites sont des mélanges de substances comburantes et de combustibles distincts, tous deux des particules solides (p. ex. poudre ou cristaux), maintenus ensemble par un matériau caoutchouteux appelé liant (figure 55). Ils fournissent un propergol solide, chimiquement stable, structurellement robuste, stockable, de haute performance et solide pour les moteurs fusée. Les propergols composites à double base modifiée (CMDB) peuvent être soit des propergols composites avec certains ingrédients à double base, soit des propergols à double base avec certains ingrédients composites. Le terme CMDB peut également désigner des propergols composites dans lesquels le liant est un matériau à double base très énergétique. Les substances à double base contiennent essentiellement du carburant et un oxydant sur différentes parties de la même molécule, comme la nitrocellulose et la nitroglycérine.



Schéma 55: Propergol composite fabriqué pour un usage dans les moteurs fusée (Daicel Chemical Industries, Ltd)

**Mode de fonctionnement:** Les liants, carburants et oxydants sélectionnés sont mélangés dans des proportions particulières et coulés (coulés puis solidifiés) directement dans les carters de moteurs fusée ou dans un moule pour être ensuite insérés dans un boîtier (chargé de cartouches). Pour l'une ou l'autre méthode, le bloc cylindrique de propergol solide est appelé le grain du propergol. À l'intérieur d'un moteur-fusée à propergol solide, le grain a généralement une zone ouverte centrale où la combustion a lieu. Alternativement, il y a des grains à combustion



- Argentine
- Canada
- France
- Inde
- Italie
- Corée du Nord
- Pakistan
- Fédération de Russie
- Suède
- Taïwan
- États-Unis
- Brésil
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Norvège
- République de Corée
- Espagne
- Suisse
- Royaume Uni

## Production globale



finale. Une fois enflammé, le grain de propergol brûle à sa surface exposée (interne ou à son extrémité seulement), tandis que l'extérieur du grain est collé au boîtier pour éviter la combustion sur sa surface extérieure. Il en résulte une production régulière de gaz d'échappement à haute pression et température élevée qui s'échappent à des vitesses extrêmement rapides pour fournir la poussée. Une fois enflammé, le propergol solide ne peut pas être facilement étouffé ou éteint car il brûle sans air et à très haute température.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les propergols composites et composites modifiés à double base sont utilisés pour fournir l'énergie propulsive de nombreux systèmes de fusées, y compris les étages pour les missiles balistiques et les lanceurs spatiaux, et pour les moteurs d'appoint pour le lancement de missiles de croisière et d'autres véhicules aériens sans pilote (UAV).

**Autres usages:** À plus petite échelle, les propergols solides sont également utilisés dans les missiles tactiques et parfois pour les satellites et les engins spatiaux. L'élévation de l'orbite de l'orbite de transfert géosynchrone (GTO) vers l'orbite géostationnaire terrestre (GEO) a parfois été réalisée avec du propergol solide en utilisant des moteurs d'apogée. Les applications spatiales ont également inclus l'atterrissage lunaire sans pilote (Surveyor vers 1965) et l'insertion en orbite à Vénus (Magellan 1989).

**Aspect (sortie d'usine):** Généralement, le propergol solide est moulé en grains peu de temps après le mélange, de sorte que l'apparence manufacturée est soit un grain seul, soit un grain à l'intérieur d'un carter de moteur fusée cylindrique, ce dernier ayant généralement une tuyère conique à son extrémité pour faire un moteur fusée plein complet. Si l'on considère uniquement le grain, les propergols composites et composites modifiés à double base sont des matériaux durs et caoutchouteux dont la texture et l'apparence ressemblent à celles des pneus d'automobile (figure 56). Des ingrédients comme l'aluminium ou une autre poudre métallique lui donnent une couleur gris foncé; cependant, d'autres additifs - inclus pour contrôler les propriétés balistiques et mécaniques, ainsi que pour assurer la stabilité chimique - peuvent faire varier la couleur (du rouge au vert au brun au noir).

**Aspect (à l'emballage):** Une fois que les composants des propergols sont mélangés, ils sont versés directement dans le carter du moteur (qui est généralement la paroi extérieure d'un étage de missile) et se solidifient en une seule pièce de matériau pour former un grain complet à l'intérieur du moteur. Ainsi, ces propergols ne sont expédiés qu'en tant que composant interne principal d'un moteur fusée chargé et ne sont généralement pas séparés d'un carter de moteur. Les exceptions se limitent aux systèmes chargés de cartouches qui s'adaptent à une cartouche de propergol dans le carter d'un moteur, généralement conçus uniquement pour les petits moteurs.



Schéma 56: Un échantillon de propergol à double base de moteur fusée. (Bayern-Chemie GmbH)

Les moteurs de fusée à propergol solide destinés aux engins spatiaux doivent optimiser la quantité de propergol par rapport à la masse de l'enveloppe. Par conséquent, ces moteurs fusées à propergol solide ont une forme presque sphérique plutôt que cylindrique car l'aérodynamique n'est pas un problème dans l'espace (aucun avantage à être long et étroit).

**Informations complémentaires:** Le composant carburant le plus couramment utilisé dans les propergols composites est la poudre d'aluminium, qui a un meilleur rendement et une plus grande facilité d'utilisation que les autres poudres métalliques qui peuvent être utilisées. Le composant oxydant de choix est le perchlorate d'ammonium (AP); les autres oxydants sont le perchlorate de métal sans aluminium, le nitrate d'ammonium (AN) et le dinitramide d'ammonium (ADN).

L'utilisation de perchlorates métalliques ou d'AN diminue considérablement les performances et n'a donc qu'une utilisation limitée dans les propergols spécialisés. L'ADN est un oxydant plus récent que l'AP, avec de meilleures performances que l'AP, mais sa disponibilité est limitée et il est plus difficile à utiliser. Les explosifs puissants HMX et RDX peuvent être utilisés comme adjuvants à l'AP afin d'augmenter les performances du propergol. Le liant utilisé dans les propergols composites est normalement un caoutchouc synthétique; le meilleur est le polybutadiène à terminaison hydroxyle (HTPB). Les autres liants sont le polybutadiène à terminaison carboxy (CTPB), le polymère polybutadiène-acide acrylique (PBAA) ou le terpolymère polybutadiène-acide acrylique - acrylonitrile (PBAN). Les polyesters et polyéthers élastomères tels que le polypropylène glycol peuvent également être utilisés comme liants. Le propergol composite modifié à double base utilise également de la nitrocellulose plastifiée avec de la nitroglycérine ou d'autres esters nitrés comme système liant.

## 4.C.2. Carburants comme suit:

a. Hydrazine (CAS 302-01-2) concentration supérieure à 70 %;

b. Dérivés de l'hydrazine comme suit:

1. Monométhylhydrazine (CAS 60-34-4);
2. Diméthylhydrazine dissymétrique (UDMH) (CAS 57-14-7);
3. Mononitrate d'hydrazine; (CAS 13464-97-6);
4. Triméthylhydrazine (CAS 1741-01-1);
5. Tétraméthylhydrazine (CAS 6415-12-9);
6. N,N diallylhydrazine; (CAS 5164-11-4);
7. Allylhydrazine (CAS 7422-78-8);
8. Dihydrazine d'éthylène; (CAS 6068-98-0);
9. Dinitrate de monométhylhydrazine;
10. Nitrate de diméthylhydrazine dissymétrique;
11. Azoture d'hydrazinium; (CAS 14546-44-2);
12. 1,1-Zoture de diméthylhydrazinium; (CAS 227955-52-4) /  
1,2-Zoture de diméthylhydrazinium; (CAS 299177-50-7);
13. Dinitrate d'hydrazinium;
14. Dihydrazine d'acide diimido-oxalique; (CAS 3457-37-2);
15. Nitrate de 2-hydroxyéthylhydrazine (HEHN);
16. Perchlorate d'hydrazinium (CAS 27978-54-7);
17. Diperchlorate d'hydrazinium; (CAS 13812-39-0);
18. Nitrate de méthylhydrazine (MHN); AS 29674-96-2);
19. Nitrate de 1,1 diéthylhydrazine (DEHN) /  
Nitrate de 1,2-diéthylhydrazine (DEHN) (CAS 363453-17-2);
20. Nitrate de tétrazine (3,6-dihydrazine) (DHTN);

**Notes techniques:**

*Le nitrate de tétrazine (3,6-dihydrazine) est également appelé nitrate de 1,4-dihydrazine*

**Nature et But:** L'hydrazine, le MMH et l'UDMH sont des carburants liquides pour fusées. Ils sont utilisés dans une grande variété de moteurs fusée à propergol liquide nécessitant de hautes performances et de longues durées de stockage. Tous les trois sont dits "stockables" car ils restent liquides à température ambiante et à pression atmosphérique (contrairement à l'hydrogène liquide par exemple). L'hydrazine est largement utilisée comme monopropulseur (sans comburant) en la décomposant en gaz chauds (hydrogène, azote et ammoniac) avec un catalyseur. L'hydrazine a été mélangée avec des carburants MMH ou UDMH afin d'améliorer les performances.

**Mode de fonctionnement:** La famille des carburants hydrazine est hypergolique (auto-allumage) au contact de divers comburants tels que le tétroxyde d'azote, l'acide nitrique, le chlore ou le fluor. Lorsqu'elle est utilisée dans un système bipropulseur, l'hydrazine libère environ la moitié de son énergie en se décomposant en gaz chaud et l'autre moitié en brûlant l'hydrogène obtenu avec un comburant.

- Brésil
- Chine
- France
- Allemagne
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

Production  
globale



**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'hydrazine naturelle ( $N_2H_4$ ) est parfois appelée "hydrazine pure" afin de la distinguer du MMH, de l'UDMH, des mélanges et des dilutions d'eau. Bien que l'hydrazine pure puisse être brûlée avec un comburant, la combustion sans risque est plus difficile qu'avec le MMH, par exemple. Bien que l'hydrazine ait un meilleur rendement énergétique que le MMH et l'UDMH, elle gèle plus facilement que l'eau. Le MMH et l'UDMH sont les combustibles préférés des missiles en raison de leur meilleure stabilité de combustion et parce qu'ils restent liquides sur une fourchette de températures beaucoup plus large, par exemple de  $-50\text{ °C}$  à  $+70\text{ °C}$ . L'inclusion d'hydrazine dans les mélanges améliore la performance énergétique sans sacrifier la fourchette de température de stockage. D'autres substances énumérées à l'alinéa 4.C.2.b. du MTCR peuvent également être utilisées dans des mélanges de combustibles pour diverses raisons.

L'hydrazine, le MMH et l'UDMH sont largement utilisés en combinaison avec le tétr oxyde d'azote ( $N_2O_4$  ou "NTO") dans les moteurs fusée bipropulseurs. Une considération pratique est que le rapport souhaité pour le MMH et le NTO permet d'utiliser des réservoirs de taille égale pour le carburant et le comburant.

Les réactions des hydrazines méthylées et autres hydrazines allyliques avec le  $N_2O_4$  dans des conditions idéales devraient produire du  $CO_2$ ,  $N_2$  et  $H_2O$ . Cependant, la combustion complète est rarement, voire jamais, atteinte dans les mises à feu réelles du moteur. Pour diverses raisons, notamment le calage des soupapes et le contact insuffisant entre le carburant et les injecteurs d'oxydant, la combustion est moins complète pendant le fonctionnement en mode pulsé (marche-arrêt) des moteurs fusée bipropulseurs, ce qui est nécessaire pour effectuer des manœuvres précises. Même en mode pulsé, les températures moyennes de la chambre de combustion sont plus basses, ce qui contribue également à une combustion incomplète.

**Autres usages:** L'hydrazine est le propergol le plus courant et le plus utilisé pour les petits propulseurs catalytiques monopropulseurs pour le contrôle d'attitude des engins spatiaux et les manœuvres mineures des satellites. Les changements de vitesse importants pour les satellites utilisent un comburant avec du MMH, de l'UDMH ou un mélange de carburant hydrazine. L'hydrazine est également utilisée dans le placage électrolytique des métaux sur le verre et les plastiques, les produits pharmaceutiques, les piles à combustible, les teintures, les produits chimiques photographiques et agricoles, ainsi que comme catalyseur de polymérisation et inhibiteur de corrosion dans l'eau d'alimentation des chaudières (traitement des eaux) et de refroidissement des réacteurs. Le MMH est utilisé dans les groupes électrogènes de secours des avions.

**Aspect (sortie d'usine)** L'hydrazine est un liquide clair dont le point de congélation est légèrement supérieur à celui de l'eau, à environ 2 °C, et dont le point d'ébullition normal est de 114 °C. Sa densité est légèrement supérieure à celle de l'eau, à 1,003 g/cc. Elle est irritante pour la peau, les yeux et les poumons, et est très toxique lorsqu'elle est ingérée. Le MMH est un liquide clair dont le point de congélation est de -52 °C et le point d'ébullition normal de 88 °C. Ces caractéristiques en font un combustible intéressant pour les missiles militaires tactiques. Il a une densité plus faible de 0,87 g/cc et est également très toxique. L'UDMH, également toxique, est un liquide clair dont le point de congélation est de -57 °C et le point d'ébullition normal de 62 °C. Sa densité est de 0,78 g/cc.

**Aspect (à l'emballage):**

L'hydrazine anhydre (eau éliminée), le MMH et l'UDMH sont classés comme liquides inflammables et poisons. Les produits d'hydrazine peuvent être entreposés et expédiés dans des barils ou des réservoirs en aluminium, en acier inoxydable de série 300 et en alliages de titane. Les petits achats sont généralement emballés dans des fûts portatifs, tandis que les grosses commandes sont expédiées dans des wagons-citernes de chemin de fer. Les contenants de carburant de la famille de l'hydrazine sont tous remplacés par un gaz inerte comme l'azote pour prévenir la contamination et ralentir l'oxydation. S'ils sont correctement étiquetés (figure 57), les conteneurs doivent porter la mention "inflammable" et comporter des informations numériques telles que les désignations des Nations Unies pour les envois internationaux dangereux. Les numéros ONU 2029, 1244 et 1163, respectivement, pour l'hydrazine anhydre, le MMH et l'UDMH, sont des exemples de ces derniers. Il existe également un système de numéros d'enregistrement du Chemical Abstracts Service (CAS).



Schéma 57: Containers d'expédition de 34 gallons pour l'hydrazine anhydre en acier inoxydable de série 300. (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))

4.C.2.c. Poudre d'aluminium à grain sphérique (CAS 7429-90-5), composée de particules d'un diamètre uniforme inférieur à  $200 \times 10^{-6}$  m (200  $\mu$ m), fabriquée à partir d'un matériau ayant une teneur en poids en aluminium supérieure ou égale à 97 %, si au moins 10 % du poids total est constitué de particules de moins de 63  $\mu$ m selon la norme ISO 2591:1988, ou normes équivalentes;

**Notes techniques:**

*Une taille de particule de 63  $\mu$ m (ISO R-565) correspond à 250 mesh (Tyler) ou 230 mesh (norme ASTM E-11).*

4.C.2.d. Poudre de zirconium (CAS 7440-67-7), de béryllium (CAS 7440-41-7), de magnésium (CAS 7439-95-4) ou d'alliages de ces métaux, si au moins 90 % du volume ou du poids total des particules sont constitués de particules de moins de 60  $\mu$ m (déterminées par des techniques de mesure telles que tamis, diffraction laser ou balayage optique) sous forme sphérique, atomisée, sphéroïdale, en paillettes ou broyée, contenant au moins 97% en poids de l'un des métaux susmentionnés;

**Note:**

*Dans une distribution multimodale de particules (par exemple, des mélanges de différentes granulométries) dans laquelle un ou plusieurs modes sont contrôlés, l'ensemble du mélange de poudre est contrôlé.*

**Notes techniques:**

*La teneur naturelle du zirconium en hafnium (CAS 7440-58-6) (généralement de 2 à 7%) est comptée avec le zirconium.*

4.C.2.e. Poudres métalliques de bore (CAS 7440-42-8) ou d'alliages de bore ayant une teneur en bore égale ou supérieure à 85% en poids, si au moins 90% du volume ou du poids total des particules sont constitués de particules de moins de 60  $\mu$ m (déterminées par des techniques de mesure telles que le tamis, la diffraction laser ou le balayage optique), qu'elles soient sous forme sphérique, atomisée, sphéroïdale, en paillettes ou broyées

**Note:**

*Dans une distribution multimodale de particules (par exemple, des mélanges de différentes granulométries) dans laquelle un ou plusieurs modes sont contrôlés, l'ensemble du mélange de poudre est contrôlé.*

4.C.2.f. Matières à haute densité d'énergie qui peuvent être utilisées dans les systèmes mentionnés à l'article 1.A. ou à l'article 19.A, comme suit:

1. Carburants mixtes qui contiennent des carburants solides et liquides tels que les bouillies de bore ayant une densité d'énergie égale ou supérieure à  $40 \times 10^6$  J/kg;
2. Autres carburants et additifs pour carburants à haute densité d'énergie (par exemple cubane, solutions ioniques, JP-10) ayant une densité d'énergie de  $37,5 \times 10^9$  J/m<sup>3</sup> ou plus, mesurée à 20°C et une pression d'une atmosphère (101,325 kPa).

**Note:**

*L'article 4.C.2.2. ne couvre pas les carburants fossiles raffinés et les biocarburants produits à partir de végétaux, y compris les carburants moteurs certifiés destinés à un usage dans l'aviation civile, à moins d'avoir été spécialement formulés pour les systèmes mentionnés à l'article 1.A. ou à l'article 19.A.*



- Brésil
- Chine
- Inde
- Japon
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis
- Canada
- France
- Iran
- Pakistan

Production globale



**Nature et But:** Les métaux aluminium, béryllium, bore, magnésium et zirconium constituent de bons combustibles dont la taille des particules est inférieure à  $60 \times 10^{-6}$  m ( $60 \mu\text{m}$ ) et qui sont utilisés comme carburant constitutif pour améliorer la performance des propergols solides et liquides de fusées. Par exemple, la poudre d'aluminium en tant qu'additif pour carburant représente de 5% à 21% en poids de propergol solide. La combustion du carburant en aluminium augmente la température de la flamme du propergol jusqu'à  $800 \text{ }^\circ\text{K}$  et augmente l'impulsion spécifique jusqu'à 10%.

**Mode de fonctionnement:** De la poudre métallique est ajoutée soit au grain de propergol solide pendant la production du moteur-fusée, soit au combustible liquide de la fusée pour former une bouillie. Comme le rapport surface-

volume de ces petites particules métalliques est très élevé, l'oxydant enveloppe et brûle rapidement chaque particule métallique, libérant ainsi une énergie élevée par poids à très haute température. Il existe également des carburants à haute densité énergétique et des additifs de carburant conçus pour les missiles qui n'utilisent pas de poudres métalliques.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La poudre d'aluminium est relativement peu coûteuse et est largement utilisée comme composant combustible dans les moteurs de fusées à propergol solide et liquide pour augmenter l'impulsion spécifique du propergol et pour aider à stabiliser la combustion. Le béryllium, le bore, le magnésium et le zirconium métal peuvent également être utilisés, mais en pratique, ils présentent peu d'applications militaires liées aux missiles. En général, ils sont coûteux, dangereux à manipuler et difficiles à contrôler. Les moteurs au béryllium ont été développés uniquement comme étages supérieurs en raison de la toxicité de certains de leurs produits d'échappement.

Certains carburants à haute densité énergétique sont spécialement conçus pour les missiles, comme le Jet Propellant 10 (JP-10) pour les missiles de croisière à volume limité, et certaines formules de kérosène pour les fusées. D'autres matériaux à haute densité énergétique, comme le cubane ou le quadracyclane, peuvent être utilisés comme additif de carburant pour gagner plus de secondes d'impulsion spécifique pour les systèmes de fusée et les propergols existants, mais ils sont difficiles à synthétiser et coûteux à produire en quantité.

**Autres usages:** La poudre d'aluminium est utilisée comme ingrédient principal dans la peinture d'aluminium pulvérisée. La poudre d'aluminium sphérique est utilisée comme catalyseur et comme composant dans les revêtements pour les coques de turbines, dans les matériaux de construction comme le béton cellulaire et comme matière première dans les machines de fabrication d'additifs. Le magnésium est principalement utilisé dans l'industrie pyrotechnique. Le bore est parfois utilisé en bouillie de carburant pour les fusées à canalisations et les statoréacteurs à propergol solide pour les missiles tactiques.

Le zirconium a été utilisé dans certains propergols composites à haute densité pour des applications tactiques à volume limité. Le bore et le zirconium sont utilisés dans les composés d'allumage des allumeurs.

**Aspect (sortie d'usine)** La poudre d'aluminium est une poudre grise ou argent mat. La taille des particules de la plupart des poudres d'aluminium de qualité propulsive varie de 3 à 100 microns, bien que des tailles plus grandes aient été utilisées. La forme des particules est plus ou moins sphérique. Le béryllium, le magnésium et le zirconium sont aussi des poudres grises ou argent mates. Le bore est une poudre brun foncé. L'apparence de la boue de bore dépend du liquide auquel il est ajouté et de la taille des particules de bore; typiquement, la couleur est brun foncé ou noir. Par exemple, le bore mélangé au dicyclopentadiène est un carburant de statoréacteur potentiel et forme une suspension brun chocolat avec la consistance du miel. Les combustibles pour missiles, tels que le propergol pour fusée 1 (RP-1) et le JP-10, ont une apparence similaire à celle des carburateurs, qui sont transparents aux

liquides de couleur ambre.

**Aspect (à l'emballage):** La poudre d'aluminium est généralement emballée et expédiée dans des barils en acier d'une capacité de 30 gallons ou moins. La poudre d'aluminium dans un baril de 30 gallons pèse environ 180 kg. Les autres métaux, bien que beaucoup moins susceptibles d'être utilisés, sont emballés de la même façon. Les combustibles de missiles, tels que JP-10 et RP-1, peuvent être emballés et expédiés dans des fûts de 55 gallons. Étant donné les grandes quantités de RP-1 utilisées dans les systèmes de fusées, il peut également être transporté dans de grandes remorques-citernes d'une capacité de 7 000 gallons.

**Informations complémentaires:** L'aluminium a une densité de 2,7 g/cc, mais sa densité apparente est légèrement inférieure, selon la taille des particules. Le béryllium et ses produits de combustion sont très toxiques. Le bore est difficile à enflammer. Le zirconium est très dangereux à manipuler sous forme de poudre fine parce qu'il s'enflamme spontanément dans l'air; il est donc généralement transporté dans l'eau.

#### 4.C.2.g. Carburants de remplacement de l'hydrazine:

##### 1. 2-Diméthylaminoéthylazide (DMAZ) (CAS 86147-04-8).

**Nature et But:** Étant donné l'utilisation répandue de l'hydrazine et de ses dérivés, les dangers pour la santé de ces carburants ont motivé de nombreuses recherches sur les propergols ayant des performances énergétiques et des propriétés physiques similaires, tout en étant moins dangereux pour les personnes exposées (inhalation de vapeur ou contact cutané).

Pour la propulsion des fusées bipropulsives, le 2-diméthylaminoéthylazide (DMAZ) a suscité beaucoup d'intérêt comme substitut potentiel de la monométhylhydrazine (MMH) et de la diméthylhydrazine dissymétrique (UDMH). Le DMAZ a une densité très proche de celle de l'eau, avec un point de congélation bas (moins 69 °C) et un point d'ébullition élevé (135 °C).

D'autres substances ont été étudiées en remplacement non toxique de l'hydrazine pure, pour la propulsion monopropulseur. Un type d'alternative consiste en des matériaux énergétiques solides dissous dans l'eau. Un exemple de ce dernier est le nitrate d'hydroxylammonium (HAN), qui a fait l'objet de nombreuses expérimentations, mais qui n'est pas contrôlé au point 4.C.2.g.

**Mode de fonctionnement:** DMAZ serait utilisé comme MMH et UDMH. Le DMAZ serait combiné dans un système de propulsion liquide avec un comburant stockable tel que NTO ou IRFNA (voir article 4.C.4 du MTCR).

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les utilisations du DMAZ liées aux missiles seraient essentiellement les mêmes que celles du MMH ou de l'UDMH (article 4.C.2.b. du MTCR).

**Autres usages:** N/A



**Aspect (sortie d'usine)** Le DMAZ est un liquide transparent.

**Aspect (à l'emballage):** Le DMAZ serait conditionné en fûts et étiqueté comme liquide combustible.

#### 4.C.3. Combustants/carburants, comme suit:

Perchlorates, chlorates ou chromates mélangés avec des poudres métalliques ou avec d'autres composants à haute énergie.

**Nature et But:** Les perchlorates, les chlorates et les chromates mélangés à des composants combustibles de toutes sortes (p. ex., les métaux en poudre) sont extrêmement instables et peuvent s'enflammer ou exploser. AP, le comburant de choix pour la plupart des applications de propergol solide, est rarement expédié en grandes quantités en vrac mélangé à un composant combustible en raison du risque de combustion associé. Toutefois, ces mélanges sont expédiés dans des composants tels que des amorces ou dans de petits emballages (environ 3 kg).

- Il n'existe aucun fournisseur connu de ces mélanges en raison du risque d'incendie extrême; cependant, de nombreux pays peuvent créer et expédier de tels mélanges.

Production  
globale



**Mode de fonctionnement:** L'oxygène contenu dans les perchlorates, les chlorates et les chromates est libéré lors de la combustion, ce qui le rend disponible pour brûler le combustible à haute énergie dans le mélange de propergol. Comme l'oxygène est réparti uniformément dans tout le mélange, il brûle très rapidement sans air et ne peut être éteint une fois enflammé.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'AP mélangé à de l'aluminium en poudre est couramment utilisé dans les moteurs de fusées à propergol solide. D'autres mélanges de combustibles et de

combustibles sont généralement utilisés dans les dispositifs d'allumage ou de retardement des missiles et sont rarement utilisés à d'autres fins dans les missiles.

**Autres usages:** Lorsqu'ils sont mélangés à des métaux en poudre, les perchlorates, les chlorates ou les chromates ont une utilisation commerciale dans les fusées éclairantes et les dispositifs incendiaires.

**Aspect (sortie d'usine)** La couleur de ces matériaux varie selon le comburant et le combustible utilisés. De nombreuses combinaisons existent, mais les plus probables (AP et poudre d'aluminium) sont des matériaux gris clair avec une texture très fine.

**Aspect (à l'emballage):** Les perchlorates, chlorates ou chromates, lorsqu'ils sont mélangés à des métaux en poudre, présentent des risques d'incendie ou d'explosion extrêmes et sont très peu susceptibles d'être expédiés dans ces mélanges. Ils sont plutôt expédiés séparément des métaux en poudre ou d'autres composants de combustible à haute énergie, puis mélangés ensemble avant d'être moulés dans un étage moteur.

4.C.4. Comburants, substances, comme suit:

a. Substances de comburants utilisables dans les moteurs-fusées à propergol liquide, comme suit:

1. Trioxyde de diazote (CAS 10544-73-7)
2. Dioxyde d'azote (CAS 10102-44-0) / tétroxyde de diazote (CAS 10544-72-6);
3. Pentoxyde de diazote (CAS 10102-03-1)
4. Oxydes d'azote mélangés (MON);
5. Acide nitrique fumant rouge inhibé (IRFNA) (CAS 8007-58-7);
6. Matières composées de fluor et d'un ou plusieurs autres halogènes, d'oxygène ou d'azote;

**Note:**

*L'article 4.C.4.a.6. ne mentionne pas le trifluorure d'azote (NF<sub>3</sub>) (CAS 7783-54-2) à l'état gazeux, car il n'est pas utilisable pour les applications de missiles.*

**Notes techniques:**

*Les oxydes d'azote mélangés (MON) sont des solutions de monoxyde d'azote (NO dans du tétroxyde d'azote/dioxyde d'azote (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/NO<sub>2</sub>) qui peuvent être utilisées dans les systèmes de missiles. Il existe diverses séries de compositions qui peuvent être représentées par les symboles MON<sub>i</sub> et MON<sub>ij</sub> où i et j sont des nombres qui représentent le pourcentage de monoxyde d'azote dans le mélange (par exemple, MON<sub>3</sub> contient 3% d'oxyde nitrique, et MON<sub>25 25</sub> 25% d'oxyde nitrique. La limite supérieure est MON<sub>40</sub>, 40% en poids.)*

**Nature et But:** Les comburants fournissent de l'oxygène ou de l'halogène pour brûler le carburant dans n'importe quel moteur-fusée ou moteur. En transportant le combustible et le comburant ensemble, un missile ne dépend pas de l'atmosphère pour son oxygène et peut donc fonctionner dans l'espace. De plus, le débit de comburant d'un moteur de missile tend à être beaucoup plus élevé que le taux de capture de l'oxygène atmosphérique qui pourrait être obtenu par une entrée d'air.

**Mode de fonctionnement:** Dans les moteurs fusée à propergol liquide, le comburant et le carburant sont alimentés par des réservoirs séparés puis injectés dans la chambre de combustion à haute pression, mélangés et allumés. Dans les deux cas, la chaleur provoque la dissociation des atomes d'oxygène ou d'halogène des molécules comburantes fournies et les rend plus disponibles pour la combustion du combustible. Certains propergols liquides sont hypergoliques, ce qui signifie qu'ils réagissent spontanément au contact. Les gaz chauds qui en résultent s'accélèrent à travers une tuyère de fusée pour produire de la poussée.

Les substances comburantes énumérées à l'article 4.C.4.a. du MTCR sont très réactives et hypergoliques avec les combustibles avec lesquels elles sont habituellement appariées (habituellement l'hydrazine et les combustibles connexes). La combustion hypergolique permet d'allumer et d'éteindre les moteurs de fusée de manière très fiable en commandant simplement les soupapes, sans avoir besoin d'une source d'inflammation séparée à l'intérieur de la chambre de combustion. L'absence d'allumeur séparé permet de rendre les moteurs à propergol liquide hypergoliques aussi bien petits que grands, et il n'y a pas de limite particulière au nombre de redémarrages. Des manœuvres de précision répétées sont donc possibles. Une autre caractéristique des propergols hypergoliques couramment utilisés tient au fait qu'ils sont généralement liquides à température ambiante, contrairement à l'oxygène liquide, par exemple. En raison de leur commodité relative, ces propergols ont été appelés "propergols stockables sur terre", ou simplement "propergols stockables". Un inconvénient important des produits stockables hypergoliques est qu'ils sont extrêmement toxiques pour l'homme et réagissent avec la plupart des matériaux

normalement utilisés dans les conteneurs de stockage de propergol ou les dégradent.

- Brésil
- France
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis
- Dans le monde entier (pour les acides nitriques)
- Seuls la Fédération de Russie, la Suède, et les États-Unis ont produit de l'ADN

Production globale



#### Utilisations typiques liées aux missiles:

*Le trioxyde de diazote* (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) est un liquide noir à pression atmosphérique normale qui se décompose au-dessus de 3,5 °C et gèle à -102 °C. Le N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> n'est pas souvent utilisé comme propergol de missile.

*Le tétroxyde de diazote* (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), également connu sous le nom de tétroxyde d'azote (NTO), est un dimère de deux molécules de gaz du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Le NO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> forment un équilibre, avec une plus grande dissociation au NO<sub>2</sub> à des températures élevées et des pressions réduites. Bien que les deux molécules coexistent, le liquide est généralement simplement appelé N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ou NTO. Le N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> est un liquide à la pression atmosphérique et à la température normales (de moins 11 °C à plus 21 °C). Cette fourchette de température étroite rend le NTO impraticable dans les systèmes qui doivent être stockés pleins de propergol, comme les missiles mobiles et tactiques. Cependant, il a été utilisé avec succès pour les lanceurs spatiaux (SLV) qui sont remplis peu avant le lancement, ainsi que pour les missiles maintenus dans des environnements à température contrôlée tels que les silos (le Titan américain était à la fois un missile en silo et un SLV).

Afin de réduire la température de congélation du NTO, l'oxyde nitrique (NO) est souvent mélangé. Le résultat est appelé oxydes mixtes d'azote (MON), représentés par MON-*i*, où «*i*» est un nombre pour le pourcentage de NO. Bien que le MON-3 soit couramment utilisé, des moteurs fusée ont été utilisés avec le MON-1, le MON-10, le MON-15 et le MON-25. Ces propergols sont des liquides verts avec des pressions de vapeur élevées et des températures de gel plus basses qui peuvent permettre une utilisation finale dans les missiles tactiques.

*Le pentoxyde de diazote* (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) n'est pas normalement utilisé comme comburant dans des moteurs-fusées à propergol liquide parce que c'est un solide à pression atmosphérique et température normales.

*L'acide nitrique fumant rouge inhibé* (ANFRI) a une haute densité et un point de congélation bas; c'est un comburant acide nitrique généralement disponible et préféré pour les missiles tactiques et quelques missiles balistiques. L'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) est le plus souvent vendu sous forme de solution concentrée dans l'eau, par exemple l'acide nitrique à 70 % (et non un propulseur). L'eau peut être éliminée en faveur du NO<sub>2</sub>, auquel cas le résultat est appelé acide nitrique fumant rouge (ANFR) car une partie du NO<sub>2</sub> entre facilement en phase vapeur sous forme de gaz brun rougeâtre. Des substances supplémentaires sont ajoutées pour empêcher l'ANFR de corroder les réservoirs de propergol et d'autres pièces métalliques, d'où l'ANFRI, est parfois appelé pour plus de clarté "acide nitrique fumant rouge inhibé par la corrosion".

*Le trifluorure de chlore* (ClF<sub>3</sub>) et *le fluorure de chloryl (par)* (ClO<sub>3</sub>F) sont les deux comburants à base d'halogène les plus communs. Puisqu'ils sont des comburants très toxiques et énergiques, il est difficile de les manipuler. Ainsi, ils sont rarement utilisés sauf pour le développement de technologie. D'autres comburants inter-halogène ont été développés et testés mais ils ne sont pas utilisés en raison du coût, de la manipulation et de la sûreté. Par exemple, le pentafluorure de chlore (ClF<sub>5</sub>) et le fluorox (ClF<sub>3</sub>O) sont difficiles à fabriquer sans risque et ne sont pas disponibles. À l'origine, ils ont été développés parce que le fluor/hydrazine est une combinaison de propergol à très hautes performances, mais le fluor doit être maintenu en-dessous de son point d'ébullition (-188 °C) pour

l'empêcher de s'évaporer et de la sorte il est peu pratique de l'utiliser pour les missiles tactiques. La même chose est vraie pour le chlore. Des comburants à base d'halogène sont peu susceptibles d'être rencontrés à l'échelle mondiale;

**Autres usages:** Le N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> et le MON-3 sont couramment utilisés dans les satellites, les engins spatiaux scientifiques et les systèmes de manœuvre orbitale, généralement avec des résistances électriques sur les parois des réservoirs pour empêcher le gel. Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et le N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> sont les précurseurs de toute la production d'acide nitrique et sont utilisés comme agent nitrant pour les produits chimiques agricoles, les plastiques, le papier et le caoutchouc. Le N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est utilisé pour fabriquer des explosifs et est un agent de nitration en chimie organique.

L'acide nitrique concentré, principal constituant de l'ANFRI, est utilisé dans la fabrication de produits pharmaceutiques et d'explosifs.

Le chlore et le fluor ont de nombreuses utilisations commerciales. Le chlore est largement utilisé pour purifier l'eau, désinfecter ou blanchir les matériaux et fabriquer de nombreux composés importants, dont le chloroforme et le tétrachlorure de carbone. Le ClF<sub>3</sub> est utilisé dans le retraitement du combustible nucléaire, la fabrication de semi-conducteurs et le ClF<sub>3</sub> F est utilisé comme diélectrique gazeux dans les transformateurs.

**Aspect (sortie d'usine) (les mesures sont à la température et pression standard):** Le NO<sub>2</sub> est un gaz rouge-brun, et le N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> à des températures ambiantes typiques est un liquide rouge-brun en raison de sa teneur en NO<sub>2</sub> d'équilibre. En fonction de la température et de la pression, NO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> forment des équilibres à différents pourcentages. La densité du N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> est de 1,43 g/ml, il se congèle à -11 °C et bout à +21 °C.

Les oxydes mixtes d'azote (MON) liquides apparaissent de couleur verte en raison de l'ajout d'oxyde nitrique (NO) à l'équilibre du NO<sub>2</sub> et du N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Leur point de congélation est inférieur à celui du N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. L'aspect vert n'est généralement visible qu'à travers la verrerie, car la couleur brun-rougeâtre de la vapeur de NO<sub>2</sub> domine l'aspect lorsque l'évaporation est autorisée (par exemple, à partir d'un récipient ouvert à l'atmosphère).

L'acide nitrique fumigène rouge (ANFR) est de l'acide nitrique presque anhydre qui est stabilisé par des concentrations élevées de dioxyde d'azote ajouté. Environ 15 % de NO<sub>2</sub> est généralement dissous dans l'acide, mais on peut en ajouter davantage pour augmenter la densité du liquide. La densité maximale de l'acide nitrique (MDNA) est de 56% HNO<sub>3</sub> et 44% N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Comme l'acide nitrique est corrosif pour la plupart des matériaux non nobles (matériaux qui réagissent chimiquement), une petite quantité (environ 0,75 %) d'acide fluorhydrique (HF) est ajoutée comme inhibiteur de corrosion pour produire l'ANFRI. Lorsque l'ANFRI est stocké dans des conteneurs en acier inoxydable ou en aluminium, le HF forme des fluorures protecteurs qui réduisent les taux de corrosion des parois. L'ANFRI se congèle à environ -65 °C et bout à environ +60 °C. Sa densité à température ambiante normale est d'environ 1,55 g/ml, selon la quantité de N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ajoutée.

**Le fluor** est un élément halogène jaune pâle, fortement corrosif, toxique et gazeux. On le considère généralement comme le plus réactif de tous les éléments. Son point de congélation est de -220 °C et son point d'ébullition est de -188 °C, ce qui en fait un liquide cryogénique. Sa densité à l'état liquide est de 1,108 g/ml à son point d'ébullition.

**Le Chlore** est un gaz jaune-verdâtre qui est fortement irritant et capable de se combiner avec presque tous les autres éléments. Il est produit principalement par électrolyse du chlorure de sodium. Son point de congélation est -101 °C; son point d'ébullition est de -35 °C; et sa densité est de 1,56 g/ml (à -34 °C).

**Le pentafluorure de chlore** (ClF<sub>5</sub>), qui entre en ébullition à -14 °C à une atmosphère de pression, doit être pressurisé pour maintenir sa forme liquide à température ambiante. Sa densité est de 1,78 g/ml à +25 °C. Puisque le trifluorure de chlore (ClF<sub>3</sub>) entre en ébullition à +12 °C, il est plus facile à manipuler que le ClF<sub>5</sub> mais il doit tout de même être pressurisé pour l'expédition. Le pentafluorure de brome (BrF<sub>5</sub>) entre en ébullition à +40 °C, mais ses autres caractéristiques telles que sa sensibilité de choc, sa toxicité, son action corrosive et son potentiel inférieur

d'impulsion spécifique en font un propergol peu pratique.

*Le trifluorure d'azote* (NF<sub>3</sub>) est un comburant cryogénique qui entre en ébullition à -130 °C et a une densité de 1,55 g/ml à son point d'ébullition normal. Le tétrafluorure d'azote (N<sub>2</sub>F<sub>4</sub>) a une densité et un point d'ébullition plus élevés mais il est également cryogénique.

**Aspect (à l'emballage):** L'acide nitrique, le NTO et le MON sont généralement stockés dans des cuves en acier inoxydable qui ont été spécialement préparées. Les réservoirs et les conduites en aluminium peuvent également être compatibles. Les emballages d'expédition de ces produits chimiques utilisent des mots d'identification, des mises en garde, des étiquettes et des symboles. Le NTO et le MON doivent être expédiés dans des contenants qui maintiennent la pression, en raison des pressions de vapeur élevées associées à des points d'ébullition relativement bas.

L'ANFRI est généralement stocké et expédié dans des réservoirs en aluminium qui ont été spécialement préparés. Les réservoirs et les conduites en acier inoxydable sont également compatibles.

S'ils sont correctement étiquetés, les conteneurs doivent porter la mention «comburant» et indiquer des informations numériques telles que les désignations des Nations Unies pour les envois internationaux dangereux. Les numéros ONU 1067 et 2032, respectivement, pour les BNT ou les MON, et pour les ANFR ou les ANFRI, sont des exemples de ces derniers chiffres. Il existe également un système de numéros CAS, par exemple 10102-44-0 qui fait référence à la fois au NO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Les propergols exotiques comme le chlore et le fluor sont des liquides cryogéniques extrêmement réactifs et toxiques. En conséquence, leur expédition et leur manutention sont strictement réglementées. Les contenants métalliques ordinaires ne peuvent pas être utilisés pour les contenir. Les réservoirs surrefroidis et pressurisés doivent être expédiés sous forme liquide. Le difluorure d'oxygène (OF<sub>2</sub>) peut être stocké à basse température dans des cuves en acier inoxydable revêtues de verre spécialement préparées.

## 4.C.4.b. Combustibles utilisables dans les moteurs-fusées à propergol solide, comme suit:

1. Perchlorate d'ammonium (CAS 7790-98-9);
2. Dinitramide d'ammonium (ADN) (CAS 140456-78-6);
3. Nitramines cyclotétraméthylène-tétranitramine (HMX) (CAS 2691-41-0); cyclotriméthylène- trinitramine (RDX) (CAS 121-82-4);
4. Nitroformate d'hydrazinium (HNF) (CAS 20773-28-8);
5. 2,4,6,8,10,12-Hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20) (CAS 135285-90-4).

- |               |                        |
|---------------|------------------------|
| • Belgique    | • Chine                |
| • Danemark    | • France               |
| • Finlande    | • Allemagne            |
| • Inde        | • Pays-Bas             |
| • Norvège     | • Fédération de Russie |
| • Espagne     | • Suisse               |
| • Ukraine     | • Émirats Arabes Unis  |
| • Royaume Uni | • États-Unis           |
| • HNF         |                        |
| • Pays-Bas    | • États-Unis           |

## Production



**Nature et But:** Les combustibles solides fournissent l'oxygène nécessaire pour brûler le carburant solide des moteurs fusées. En transportant le carburant et le combustible ensemble, la fusée ne dépend pas de l'atmosphère pour l'oxygène. Les nitroamines ne sont pas des combustibles en soi; ce sont des explosifs ajoutés aux propergols pour augmenter leur performance.

**Mode de fonctionnement:** Le combustible solide est mélangé uniformément avec les carburants et coulé dans un moteur-fusée. L'oxygène se dissocie pendant le processus de combustion et devient accessible pour brûler rapidement le combustible disponible et, en générant des gaz évacués à très haute vitesse, produire de la poussée.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'AP est un agent combustible utilisé dans la plupart des formules modernes de propergol solide. Selon la

composition, il représente de 50 % à 85 % du poids du propergol.

L'ADN est un agent combustible pour propergol solide. Ce matériau est utilisé d'une manière similaire à celle de l'AP.

HMX, parfois appelé Octogène, et RDX, parfois appelé Cyclonite, sont des explosifs à haute énergie souvent ajoutés aux propergols solides pour abaisser la température de combustion et réduire la fumée. Habituellement, moins de 30 % du poids du propergol est constitué de HMX ou de RDX.

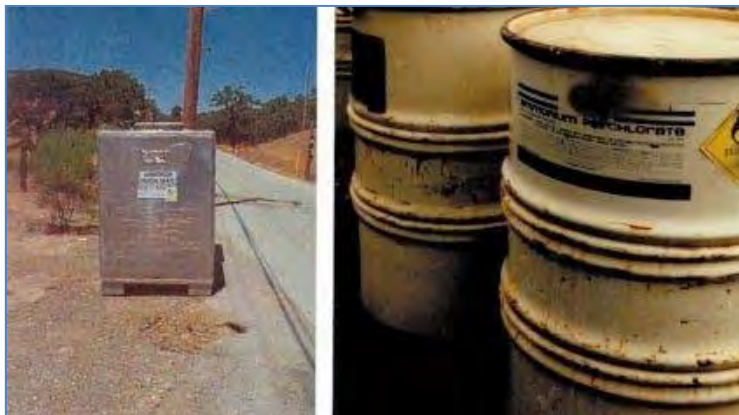
Le HNF est un combustible énergétique utilisé pour les propergols solides des fusées; sa combustion est très efficace et, lorsqu'il est combiné avec des liants modernes, a un très faible impact écologique car il est exempt de chlore. 2,4,6,8,10,12- L'hexanitrohexaazaisowurtzitane est environ 20% plus puissant que le HMX.



**Autres usages:** L'AP est utilisé dans les explosifs, la pyrotechnie et la chimie analytique, ainsi qu'en tant qu'agent de gravure et d'attaque chimique. L'ADN n'a aucune utilisation commerciale connue. Le HMX et le RDX sont utilisés dans les ogives, les explosifs militaires et civils et les coupe-tubes pour puits de pétrole. Le HNF n'a aucune utilisation commerciale connue en dehors de l'aérospatiale/du propergol de fusée.

**Aspect (sortie d'usine)** L'AP est un solide cristallin blanc ou, selon sa pureté, blanc cassé, semblable en apparence au sel de table ordinaire. L'ADN est un solide cristallin blanc, cireux et cristallin qui peut se présenter sous forme de fines plaquettes ou de petites pilules rondes. Le HMX et le RDX sont des matériaux cristallins blancs qui ressemblent à du sel de table très fin. Le HNF est un matériau cristallin jaune qui ressemble à de longues aiguilles, bien que le développement ultérieur ait produit une forme granulaire. Le 2,4,6,6,8,10,12-Hexanitrohexaazaisowurtzitane est un matériau cristallin.

**Aspect (à l'emballage):** L'AP est habituellement emballé et expédié dans des fûts de 30 ou 55 gallons doublés de polyéthylène avec des symboles de comburants ou d'explosifs. Deux types différents de conteneurs d'AP et leurs marquages sont illustrés à la figure 58. L'ADN est emballé et expédié de la même manière que l'AP. Le HMX et le RDX sont habituellement emballés et expédiés dans de l'eau ou de l'alcool (parce qu'ils sont susceptibles d'exploser à l'état sec) dans des fûts de polyéthylène de 30 ou 55 gallons doublés de polyéthylène portant des symboles de comburants et d'explosifs.



**Schéma 58: Deux conteneurs d'expédition de perchlorate d'ammonium différents (The Charles Stark Draper Laboratories & Kerr McGee)**

**Informations complémentaires:** L'AP est généralement produit avec une dimension particulaire moyenne de 200 à 400 microns (70 à 40 mesh). La densité de l'AP est de 1,95 g/cc, mais sa densité massique est moindre et varie avec la dimension particulaire. L'AP se décompose violemment avant de fondre. La formule chimique de l'AP est  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ . L'ADN a une densité de 1,75 g/cc et un point de fusion rapporté de 92 à 95 °C. La formule chimique pour l'ADN est  $\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2$ .

Le HMX et les RDX sont généralement produits avec une dimension particulaire de 150 à 160 microns (mesh 100-80). Le HMX a une densité de 1,91 g/cc, un point de fusion de 275 °C et une formule chimique de  $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$ . Le RDX a une densité de 1,81 g/cc, un point de fusion de 204 °C et une formule chimique de  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$ . Le HMX et les RDX se décomposent également violemment à leurs points de fusion.

4.C.5. Substances polymères, comme suit:

- a. Polybutadiène carboxytéléchélique (y compris le polybutadiène terminé par un carboxyle) (PBTC);
- b. Polybutadiène hydroxytéléchélique (y compris le polybutadiène terminé par un hydroxyle) (PBTC); (CAS 69102-90-5);
- c. Polymère d'azoture de glycidyle (PAG); y compris le PAG terminé par un hydroxyle
- d. Polybutadiène/acide acrylique (PBAA);
- e. Polybutadiène/acide acrylique/acrylonitrile (PBAN); (CAS 25265-19-4 / CAS 68891-50-9);
- f. Polyéthylène glycol de polytétrahydrofurane (TPEG).

**Notes techniques:**

*Le polyéthylène glycol de polytétrahydrofurane (TPEG) est un copolymère à blocs constitué de poly 1,4-butanediol et de polyéthylène glycol (PEG)(CAS 25322-68-3).*

- Chine
- France
- Inde
- Japon
- Fédération de Russie
- États-Unis

Production



**Nature et But:** Ces six polymères sont des produits chimiques utilisés comme liant et carburant du propergol solide de moteur-fusée. Ce sont des liquides qui se polymérisent pendant la fabrication du moteur pour former la matrice élastique qui maintient les ingrédients du propergol solide en une matière composite polymère semblable à du caoutchouc. Ils brûlent également comme carburants et contribuent à la poussée générale. Le GAP est le seul polymère actif de ce groupe. Il fournit de l'énergie en raison de sa décomposition pendant le processus de combustion.

**Mode de fonctionnement:** Des mélangeurs par lot (ou, rarement, des mélangeurs en continu pour la production à très grande échelle) sont utilisés pour mélanger avec soins les ingrédients du propergol de moteur-fusée en une substance polymère. Le matériel visqueux et bien mélangé est alors moulé dans une enveloppe de moteur-fusée, dans laquelle il

se polymérise et adhère au revêtement intérieur ou à l'isolateur à l'intérieur de l'enveloppe. Le résultat est un moteur-fusée entièrement chargé de propergol solide.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces substances polymères sont employées dans la production de propergol solide pour les moteurs-fusée et les moteurs-fusée hybrides. Elles sont également utilisées dans la production de plus petits moteurs-fusée à propergol solide utilisés pour lancer des véhicules aériens sans pilote et des missiles de croisière. Ces ingrédients liants affectent considérablement les performances, le vieillissement, les capacités de stockage, le traitement du propergol et la fiabilité du moteur. Bien que tous ces matériaux soient concernés en tant que liant potentiel de propergol solide, le PBHT est le liant le plus choisi. Actuellement, aucun système de missile balistique en place n'utilise de GAP ou de PBAA. Le PBTC et le PBAN ont largement supplanté le PBAA en raison de leurs meilleures caractéristiques mécaniques et de vieillissement.

**Autres usages:** Le PBAN n'a aucune utilisation commerciale connue. Le PBHT a des utilisations étendues dans les domaines de l'asphalte et de l'électronique et comme mastic.



**Aspect (sortie d'usine):** Ces six matériaux polymères sont des liquides clairs, sans couleur et visqueux. Des antioxydants sont ajoutés à un niveau de 1 % ou moins au moment de la fabrication afin d'améliorer la durée de conservation; ils donnent aux matériaux une couleur pouvant aller du jaune-clair au brun foncé. Cette couleur dépend du type et de la quantité d'antioxydant utilisé.

La viscosité de ces six liquides va de celle du sirop léger à celle de la mélasse lourde. Excepté pour le GAP, qui est presque inodore et a une densité spécifique de 1,3 g/cc, les polymères à base de polybutadiène ont une odeur de pétrole distincte et une densité légèrement inférieure à celle de l'eau (de 0,91 g/cc à 0,94 g/cc).



**Schéma 59: Un fut d'expédition de terpolymère polybutadiène-acrylique d'acide-acrylonitrile (PBAN). (The Charles Stark Draper Laboratories)**

**Aspect (à l'emballage):** Ces liquides sont généralement expédiés dans des fûts en acier de 55 gallons. L'intérieur de ces fûts est généralement enduit d'une peinture époxy ou de tout autre matériel pouvant empêcher la rouille. Si les liquides sont expédiés dans des fûts en acier inoxydable, l'enduit n'est pas nécessaire. De grands ou de petits containers peuvent être utilisés selon la quantité expédiée; des wagons-citernes ou des camions-citernes peuvent être utilisés pour expédier de très grandes quantités. Un exemple de PBAN dans son fût d'expédition est présenté sur le schéma 59.

#### 4.C.6. Autres agents et additifs de propergol comme suit:

Agents liants comme suit:

1. Oxyde de tris (1-(2-méthyl) aziridiny) phosphine (MAPO) (CAS 57-39-6);
2. 2, 1,1',1''-Trimésol-tris (2-éthyl) aziridine (HX-868)-(BITA) (CAS 7722-73-8);
3. Tépanol (HX-878), produit de la réaction de la tétraéthylènepentamine, de l'acrylonitrile et du glycidol (CAS 68412-46-4);
4. Tepan (HX-879), produit de la réaction de la tétraéthylènepentamine et de l'acrylonitrile (CAS 68412-45-3);
5. Amines d'aziridine polyfonctionnels ayant un squelette isophtalique, trimésique, isocyanurique ou triméthyladipique et portant aussi un groupement 2-méthylaziridine ou 2-éthylaziridine;

#### **Note:**

L'article 4.C.6.a.5. Comprend:

1. 1,1'- Hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20) (CAS 7652-64-4).
2. 2,4, 6-tris (2-éthyl-1-aziridiny) -1,3,5-triazine (HX-874) (CAS 18924-91-9);
3. 1,1'-triméthyladipoylbis (2-éthylaziridine) (HX-877) (CAS 71463-62-2)..

**Nature et But:** Les liants propulseurs sont utilisés pour améliorer la liaison ou l'adhérence entre le liant et le comburant, généralement l'AP. Ce procédé améliore considérablement les propriétés physiques du propergol en augmentant sa capacité à résister aux contraintes et aux déformations. Les agents de liants ne sont normalement utilisés qu'avec des propergols PBHT. Certains liants sont utilisés comme agents de vulcanisation ou de réticulation avec des propergols PBTC ou PBAN.

- **MAPO**
- France
- Japon
- États-Unis

- Inde
- Fédération de Russie

- **BITA, Tepanol and Tepan, PAAs**

- États-Unis
- Les États-Unis sont le principal producteur et fournisseur de ces matériaux, mais certains pays d'Europe et d'Asie peuvent avoir des licences de production, et la production de ces matériaux peut être plus répandue parce que la composition de ces matériaux est de source ouverte et les méthodes de production ne sont pas difficiles à

Production globale



**Mode de fonctionnement:** Des agents de liaison sont ajoutés au propergol pendant l'opération de mélange à des niveaux généralement inférieurs à 0,3 %. Le liant réagit avec l'AP pour produire un enduit polymère très mince sur la surface de la particule d'AP. Cet enduit polymère agit en tant qu'adhésif entre l'AP et le liant PBHT. La structure moléculaire reste plus ou moins la même.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Des agents liants du propergol sont employés pour polymériser le propergol (lier le comburant) pour les moteurs-fusée à propergol solide. MAPO est un agent de cuisson pour des prépolymères de PBTC et un agent liant pour prépolymères PBHT. Le BITA est un agent liant avec le PBHT. Le tépanol est un agent liant avec le PBHT. Les amides d'aziridine polyfonctionnels (PAA) sont des agents liants avec le PBHT et des épaississants pour le PBTC et le PBAN.

**Autres usages:** Le MAPO est employé uniquement avec le propergol de fusée. Le BITA est employé avec le PBHT dans le secteur commercial, particulièrement dans l'électronique, comme le mastic et l'agent de

polymérisation pour les prépolymères de PBTC. Le tépanol et le tépan sont utilisés uniquement pour le propergol de fusée solide. Les PAA sont utilisés pour les adhésifs dans le secteur commercial.

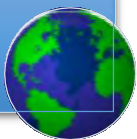
**Aspect (sortie d'usine)** Le MAPO est un liquide ambre légèrement visqueux. Il a une odeur âcre très distinctive. Il se polymérise violemment s'il entre en contact avec des acides et de l'AP. Son point d'ébullition est de 1 200 °C à 0,004 bar; sa densité est de 1,08 g/cc et sa formule chimique est C<sub>9</sub>H<sub>18</sub>N<sub>3</sub>O<sub>3</sub>. Le BITA est un liquide jaune-clair et visqueux; une fois refroidi en-dessous de 160 °C, le BITA est un solide pâle, grisâtre et cireux. Le BITA n'a aucun point de fusion nettement défini, une densité de 1,00 g/cc et sa formule chimique est C<sub>21</sub>H<sub>27</sub>N<sub>3</sub>O<sub>3</sub>. Le tépanol est un liquide jaune foncé et visqueux. Il a une odeur très forte comme celle de l'ammoniac. Le tépan est beaucoup moins visqueux que le tépanol mais tous ses autres aspects lui sont identiques et notamment son odeur très forte ressemblant à celle de l'ammoniac. Les PAA sont similaires au BITA.

**Aspect (à l'emballage):** Le MAPO est emballé et expédié dans des fûts ou des bidons en acier standards de 1 à 55 gallons. Le BITA, le Tepanol, le tépan et les PAA sont emballés dans des bidons en acier de 1 gallon qui sont généralement expédiés dans des récipients isolés emballés avec de la glace sèche et stockés à 0 °C ou moins afin de préserver sa durée de conservation utile.

## 4.C.6.b. Agents de polymérisation et catalyseurs, comme suit: Triphénylbismuth (TPB) (CAS 603-33-8);

- France
- Japon
- Suisse
- États-Unis

Production  
Globale



**Nature et But:** Les agents de vulcanisation et les catalyseurs sont utilisés pour polymériser les moteurs fusées à propergol solide, c'est-à-dire qu'ils provoquent la solidification du mélange visqueux de substance polymère liquide et d'autres ingrédients propulsifs solides en un composite caoutchouteux qui adhère au revêtement intérieur ou à l'isolant à l'intérieur de l'enveloppe du moteur.

**Mode de fonctionnement:** Le TPB est ajouté en petite quantité au PBHT pour déclencher une réaction chimique relativement faible connue sous le nom de polymérisation. La structure moléculaire du PBHT reste plus ou moins la même mais les matériaux se convertissent de la forme liquide à la forme solide en raison de la réticulation moléculaire.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le TPB est employé comme catalyseur de polymérisation dans le propergol de fusée solide au PBHT.

**Autres usages:** Le TPB est employé dans certains plastiques

**Aspect (sortie d'usine)** Le TPB est une poudre cristalline blanche ou légèrement brune. Le TPB a une densité de 1,7 g/cc, un point de fusion de 78 °C et sa formule chimique est  $C_{18}H_{15}Bi$ .

**Aspect (à l'emballage):** Le TPB est emballé dans des récipients en verre bruns en raison de sa sensibilité à la lumière. Ces récipients peuvent contenir de quelques grammes à 5 kg. Transporté en plus grande quantité, le TPB peut être emballé dans des sacs de polyéthylène à l'intérieur de paquets en fibre ou de carton.

4.C.6.c. Modifiants de la vitesse de combustion, comme suit:

1. Carboranes, décarboranes, pentaboranes et leurs dérivés;
2. Dérivés du ferrocène, comme suit:
  - a. Catocène (CAS 37206-42-1);
  - b. Ethyl ferrocene (CAS 1273-89-8);
  - c. n-Propylferrocène; (CAS 1273-92-3) / iso-propyl ferrocene (CAS 12126-81-7);
  - d. N-butylferrocène (CAS 31904-29-7);
  - e. Pentylferrocène (CAS 1274-00-6);
  - f. Dicyclopentylferrocène (CAS 125861-17-8);;
  - g. Dicyclohexylferrocène;
  - h. Diéthylferrocène (CAS 1273-97-8);
  - i. Dipropylferrocène;
  - j. Dibutylferrocène (CAS 1274-08-4);
  - k. Dihexylferrocène (CAS 93894-59-8);
  - l. Acétylferrocène (CAS 1271-55--2) / 1,1'-diacétyl ferrocène (CAS 1273-94-5);
  - m. Acide ferrocène carboxylique (CAS 1271-42-7) / acide 1,1'-Ferrocènedicarboxylique (CAS 1293-87-4);
  - n. Butacène (CAS 125856-62-4);
  - o. Autres dérivés du ferrocène utilisables pour modifier la vitesse de combustion des agents de propulsion des fusées;

**Note:**

*L'article 4.C.6.o. ne vise pas les dérivés du ferrocène qui contiennent un groupe fonctionnel de composés aromatiques à six atomes de carbone attaché à la molécule de ferrocène.*

**Nature et But:** Les modificateurs de taux de combustion sont des additifs chimiques au propergol solide de fusée qui changent le taux auquel le carburant brûle. Le but est d'ajuster la durée de combustion du moteur-fusée pour répondre à certaines exigences.

**Mode de fonctionnement:** Des modificateurs de vitesse de combustion sont mélangés en quantités soigneusement contrôlés dans le propergol de moteur-fusée pendant la production.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Elles sont ajoutées au propergol pour modifier le taux de combustion et pour permettre à des concepteurs d'ajuster le profil de poussée afin de répondre à certaines exigences.

**Autres usages:** Quelques dérivés de borane ont des utilisations commerciales comme catalyseurs dans la polymérisation d'oléfine, le traitement de l'eau, utilisé dans l'industrie pharmaceutique pour le traitement de diagnostic de maladie et comme agents dans la vulcanisation du caoutchouc.

**Aspect (sortie d'usine)** Le catocène est un liquide rouge foncé légèrement visqueux, mais semble jaune en couche mince ou à une tache jaune sur du tissu ou du papier blanc. Il s'agit d'un mélange de six isomères, ayant tous des températures d'ébullition élevées. Il est insoluble dans l'eau mais soluble dans la plupart des solvants organiques. Il a une densité de 1,145 g/cc, légèrement plus importante que celle de l'eau. La formule chimique du catocène est C<sub>27</sub>H<sub>32</sub>Fe<sub>2</sub>. Le catocène, le nom commercial de ce propane 2,2'-bis (ethylferrocenyl), est probablement le ferrocène le plus employé couramment dans l'industrie du propergol. Tous les dérivés de ferrocène contiennent du fer et sont ajoutés au propergol contenant de l'AP.

- **Pour le catocène**
  - États-Unis
- **Pour les dérivés de ferrocène**
  - Chine
  - France
  - Allemagne
  - Japon
  - Fédération de Russie
  - Suisse
  - Royaume Uni
  - États-Unis
- **Pour les dérivés de borane**
  - France
  - Fédération de Russie
  - Royaume Uni
  - États-Unis

Production globale



Le ferrocène et ses dérivés sont une poudre cristalline de couleur orange à jaune. Il s'agit d'un composé organométallique qui a une structure en sandwich.

Le N-butylferrocène et d'autres dérivés du ferrocène sont similaires en apparence au Catocène. Les ferrocènes ont moins d'applications dans les missiles de catégorie I que dans les missiles tactiques plus petits. Ils augmentent la sensibilité du propergol à l'inflammation accidentelle par friction et décharge électrostatique.

Le butacène est unique car il est à la fois un liant HTPB et un modificateur du taux de combustion. C'est un liquide à très haute viscosité qui ressemble à un sirop de maïs foncé très lourd ou à de la mélasse.

Les carboranes, décarboranes, pentaboranes et leurs dérivés sont les liquides clairs, sans couleur et sans odeur distincte. Les dérivés de carborane les plus communs utilisés dans le propergol solide sont les propionate n-hexylique et le carborane de carboranylemethyl. Selon quelques études, les carboranes peuvent causer des dommages nerveux. Les sels de métal alcalins des décarboranes et des pentaboranes sont des poudres blanches. La plupart des dérivés de borane sont moins denses que l'eau et ils sont toxiques. Des dérivés de Borane sont utilisés pour produire des taux de combustion

extrêmement élevés du propergol solide. Les dérivés de Borane sont extrêmement coûteux à produire. Ils sont rarement employés pour le propergol de missile balistique.

**Aspect (à l'emballage):** Tous ces matériaux sont expédiés dans des fûts en acier dont la capacité peut aller de 1 à 55 gallons.

## 4.C.6.d. Esters et plastifiants comme suit:

1. Dinitrate de triéthylèneglycol (TEGDN) (CAS 111-22-8);
2. Trinitrate de triméthyloléthane (TMETN) (CAS 3032-55-1);
3. Trinitrate de 1,2,4-butanetriol (BTTN) (CAS 6659-60-5);
4. Dinitrate de diéthylène glycol (DEGDN) (CAS 693-21-0);
5. 4,5 diazilométhyle-2-méthyl-1,2,3-triazole (iso-DAMTR);
6. Plastifiants à base de composés de nitroéthylnitramine (NENA), comme suit:
  - a. Méthyl-NENA (CAS 17096-47-8);
  - b. Éthyl-NENA (CAS 85068-73-1);
  - c. Butyl-NENA (CAS 82486-82-6);
7. Plastifiants à base de dinitropropyl, comme suit:
  - a. BDNPA (bis (2,2-dinitropropyl) acétal) (CAS 5108-69-0);
  - b. BDNPF (bis (2,2-dinitropropyl) formal) (CAS 5917-61-3);

• N'importe quel pays peut acquérir la capacité de produire ces produits. Tout pays qui a mis en place une usine de production de nitrates, par exemple pour la production d'explosifs, pourrait produire une variété de ces esters nitrés.

Production  
globale



**Nature et But:** Ces esters de nitrate, également connus sous le nom de plastifiants nitrés, sont des additifs au propergol de fusée solide employés pour augmenter leur taux de combustion.

**Mode de fonctionnement:** Les esters de nitrate et les plastifiants nitrés sont des explosifs liquides qui contiennent assez d'oxygène pour soutenir leur propre combustion. Ils sont généralement ajoutés aux propergols de haute performance contenant du HMX et de l'aluminium pour obtenir de meilleures performances.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les esters de nitrate et les plastifiants nitrés sont ajoutés au propergol double-base pour augmenter leur énergie de propulsion. Puisque les plastifiants ne

réagissent pas avec les agents de polymérisation et restent liquides à basse température, ils rendent les propergols solides moins susceptibles de se fissurer ou de rétrécir par temps froid.

**Autres usages:** Les esters de nitrate sont employés comme composants des explosifs militaires et commerciaux.

**Aspect (sortie d'usine)** Les esters de nitrate sont des liquides denses et huileux pouvant être clairs ou légèrement jaunes.

**Aspect (à l'emballage):** Les esters de nitrate sont expédiés dans des fûts en acier de 5 à 55 gallons identifiés par des étiquettes indiquant qu'il s'agit d'explosifs. Excepté le BTTN, ces esters de nitrate sont expédiés non dilués à moins que l'utilisateur demande qu'ils soient expédiés dilués avec du dissolvant. En raison de sa sensibilité aux chocs, le BTTN est expédié dilué avec du chlorure de méthylène ou de l'acétone. Une fois dilué avec du chlorure de méthylène, le BTTN a une odeur sucrée comme celle du chloroforme. Une fois dilué avec de l'acétone, il a une odeur semblable celle du vernis à ongles. Lorsque des stabilisateurs sont ajoutés (généralement à un niveau de 1,0 %), l'ester de nitrate prend une couleur rouge-foncée.

## 4.C.6.e. Stabilisants, comme suit:

1. 2-nitrodiphénylamine (CAS 119-75-5);
2. N-méthyl-p-nitroaniline (MNA) (CAS 100-15-2)

- **2-NDPA**

- France
- Japon
- Suisse
- Royaume Uni
- États-Unis

- **MNA**

- Suisse
- Royaume Uni
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Le 2-nitrodiphénylamine (2-NDPA) et le n-méthyl-p-nitroaniline (MNA) sont des additifs qui empêchent ou réduisent la décomposition des esters de nitrate ou de la nitrocellulose des carburants de fusée. Ces types de propergol sont désignés sous le nom de propergol double-base, double-base composites modifiés, ou réticulés double-base.

**Mode de fonctionnement:** Ces stabilisateurs changent l'environnement chimique dans du propergol pour réduire la décomposition de ses constituants.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces stabilisateurs réduisent les effets du vieillissement du propergol composite. En conséquence, ils augmentent la durée de vie effective des missiles à propergol solide.

**Autres usages:** Le 2-NDPA est utilisé dans les explosifs comme stabilisateur de nitroglycérine. Il est couramment utilisé dans toute l'industrie des munitions. Le MNA n'a aucune utilisation commerciale connue.

**Aspect (sortie d'usine)** Dans son état pur, le 2-NDPA est un solide cristallin jaune clair, avec une densité de 1,15 g/cc et un point de fusion de 74 à 76 °C. La formule chimique de 2-NDPA est C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Une fois exposé à la lumière, le 2-NDPA prend une couleur orange-foncé.

Le MNA est un solide cristallin jaune clair, avec une densité de 1,20 g/cc et un point de fusion de 152-154 °C. La formule chimique du MNA est C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**Aspect (à l'emballage):** Lors de l'expédition en petites quantités, le 2-NDPA et le MNA sont emballés dans des récipients en verre bruns parce en raison de leur sensibilité à la lumière. Lors d'expéditions en plus grande quantité, ils sont emballés dans des sacs de polyéthylène placés dans des containers en fibre ou en carton.



4.C.7 «propergols en gel» spécialement formulés pour être utilisés dans les systèmes mentionnés aux points 1.A., 19.A.1. ou 19.A.2.

Notes techniques:

*Un "propergol gélifié" est une formulation de carburant ou d'oxydant utilisant un gélifiant tel que des silicates, du kaolin (argile), du carbone ou tout gélifiant polymère.*

*N.B. Les numéros CAS figurant à l'article 4.C. sont des notes techniques. Pour l'utilisation des numéros CAS figurant à l'annexe, voir la section Introduction, point f).*

- Chine
- Allemagne
- États-Unis

Production  
globale



**Nature et But:** Le propergol en gel se présente comme un propergol solide en stockage et comme un propergol liquide en utilisation. Le propergol en gel combine la facilité de manipulation et la longue durée de stockage du propergol solide avec la capacité de réguler, contrôler la poussée et redémarrer un moteur fusée à propergol liquide. Le propergol en gel fournit une meilleure impulsion spécifique que les propergols solides ou liquides.

**Mode de fonctionnement:** L'étage pressurisé d'une fusée à propergol gélifié fournit la pression nécessaire pour forcer le propergol gélifié dans la chambre de

combustion. L'étage supérieur présentera une méthode consistant à délivrer un gaz à haute pression, soit de l'hélium, soit l'utilisation d'un générateur de gaz propulseur solide, pour pousser le gaz propulseur en gel dans la chambre de combustion. Si un générateur de gaz propulseur solide est utilisé pour générer la pression, le réservoir aura besoin d'une certaine forme de bouclier thermique.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les propergols en gel sont utilisés pour réduire le poids brut au décollage en raison de leur densité inférieure à celle du combustible liquide ou solide. Les propergols en gel offrent un haut degré de sensibilité tout en produisant un minimum de fumée, donc une faible signature. Le propergol à base de gel pourrait fournir la meilleure combinaison - permettant la modulation de la poussée comme dans les moteurs à propergol liquide pour maximiser l'endurance et la performance des armes, tout en offrant la durée de vie prolongée et la grande disponibilité opérationnelle des moteurs à propergol solide.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Les propergols en gel sont des liquides gélifiés transparents dont la consistance ferme varie de claire à jaune.

**Aspect (à l'emballage):** N/A



## 4.D. Logiciel

4.D.1. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié aux fins de l'«utilisation» de l'équipement mentionné par l'article 4.B. pour la «production» et la manipulation de matières mentionnées à l'article 4.C.

- |                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| • Argentine               | • Australie            |
| • Autriche                | • Belgique             |
| • Brésil                  | • Bulgarie             |
| • Canada                  | • Chine                |
| • République Tchèque      | • Égypte               |
| • Finlande                | • France               |
| • Allemagne               | • Grèce                |
| • Inde                    | • Iran                 |
| • Israël                  | • Italie               |
| • Japon                   | • Luxembourg           |
| • Pays-Bas                | • Nouvelle Zélande     |
| • Corée du Nord           | • Pakistan             |
| • Pologne                 | • Fédération de Russie |
| • République de Slovaquie | • Afrique du Sud       |
| • République de Corée     | • Espagne              |
| • Suède                   | • Suisse               |
| • Syrie                   |                        |

### Production globale



pour produire une taille de particules spécifique pour le comburant. Les équipements de production de poudre métallique sont utilisés pour produire les additifs pour carburant visés aux alinéas 4.C.2.c, 4.C.2.d et 4.C.2.e. Ces systèmes peuvent utiliser un logiciel de contrôle de procédé spécialement conçu pour maintenir les paramètres de procédé appropriés. Les balances (analogiques ou numériques) sont utilisées pour mesurer des quantités précises des ingrédients propulseurs (carburant, comburant, liant, inhibiteurs, stabilisateurs, modificateurs du taux de combustion et agents de durcissement). Des systèmes de mélange sous vide contrôlés par ordinateur sont utilisés pour combiner les ingrédients propulseurs afin d'obtenir une bouillie visqueuse. Le logiciel contrôle le niveau de vide, le refroidissement et les temps de mélange pour le processus. Une fois le propergol versé dans l'enveloppe du moteur, il doit être durci à température élevée pendant un certain temps. Ces paramètres de durcissement sont essentiels pour permettre aux propriétés mécaniques de se stabiliser et sont souvent contrôlés par le logiciel du four ou de la salle de durcissement.

**Nature et But:** Comme indiqué au point 4.B.1, l'équipement de production nécessaire à la fabrication du propergol liquide est courant dans les industries chimique et pétrolière. Le logiciel de contrôle des procédés de ces industries peut être utilisé dans les installations de fabrication de propergols liquides avec des modifications pour tenir compte des propriétés uniques des propergols. Les propergols liquides peuvent être toxiques, dangereux à manipuler et facilement inflammables ou favoriser la combustion. Les logiciels de contrôle des procédés spécialement conçus pour la production de ces propergols réduisent les risques et permettent d'obtenir un rendement constant.

L'équipement analytique utilisé dans les laboratoires d'essais d'acceptation des propergols liquides est largement automatisé. Cet équipement d'essai prêt à l'emploi produit des analyses fiables et précises sans modification du logiciel d'exploitation.

Les usines de production de propergols solides sont principalement des opérations orientées par lots. Les broyeurs à énergie fluide sont utilisés

L'équipement d'analyse utilisé pour évaluer le propergol solide repose également sur de l'équipement automatisé pour déterminer sa composition chimique. Les échantillons de propergol sont mis à feu et les propriétés de ces échantillons sont analysées dans des calorimètres de bombes et des spectromètres infrarouges. Les échantillons de propergol solide sont également évalués pour leur résistance mécanique et leur capacité à résister aux contraintes et aux déformations dans les équipements d'essai et de mesure assistés par ordinateur. La radiographie aux rayons X est utilisée pour évaluer les vides du propergol et l'intégrité de son liant propulseur/garniture. Ces systèmes alimentent les logiciels de contrôle de la qualité associés à la production de propergol.

**Mode de fonctionnement:** Le logiciel est chargé sur des ordinateurs aussi petits qu'un PC pour contrôler le processus spécifié. Le logiciel employé pour commander les valves électromécaniques et tout autre équipement se trouvant dans une usine chimique peut être utilisé pour contrôler le transfert de liquide, la gestion de chaleur et les autres processus employés pour fabriquer le propergol liquide. Le logiciel contrôle les paramètres de procédé pour les mélangeurs de propergol solide, l'équipement de production de poudre métallique et les stations de durcissement. Des machines de contrôle numérique sont utilisées pour fraiser et usiner les surfaces des noyaux de moteur à propergol solide pour enlever le rebut lorsque le mandrin est retiré du moteur. Dans les installations de pointe, tous les contrôleurs de processus individuels et les ordinateurs sont reliés en réseau à un centre de contrôle où les opérations globales sont surveillées.

**Autres usages:** Une grande partie des logiciels utilisés dans la production de propergols liquides et solides sont disponibles sur le marché et modifiés pour soutenir la production de propergols. Certains logiciels sont spécifiques à un processus ou à une machine et n'ont aucune autre utilisation connue.

**Aspect (sortie d'usine):** Généralement, ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique.

## 4.E. Technologie

4.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de matières mentionnés aux articles 4.B. et 4.C.

**Nature et But:** La technologie des propergols désigne les connaissances requises pour mettre au point ou utiliser l'équipement visé à l'article 4.B pour produire ou utiliser les matériaux visés à l'article 4.C pour la production de propergols liquides ou solides. Ces connaissances comprennent la formulation et la fabrication de constituants de propergol liquide ou solide, les rapports de mélange des constituants du propergol, les paramètres de fonctionnement des machines et des procédés, les dessins, les manuels et la formation. Ces connaissances sont souvent considérées comme étant propres à l'équipement ou au procédé en cause.

**Mode de fonctionnement:** La technologie employée pour concevoir les installations de production de propergol liquide peut être obtenue dans les manuels de chimie. Tout pays industriel ayant des industries chimiques ou pétrolières possède les connaissances et l'expertise de base. C'est l'acquisition ou le transfert de connaissances pour concevoir, fabriquer et utiliser les éléments nécessaires à la production de propergol liquide qui est contrôlé.

La technologie associée à la production de propergols solides est plus spécialisée. Les formules et les paramètres de traitement d'un propergol solide particulier relèvent probablement d'un pays ou d'un fabricant propriétaire et contrôlé. Toute modification apportée aux broyeurs à énergie fluide, à l'équipement de production de poudre métallique ou aux mélangeurs pour satisfaire aux exigences de production des composants et/ou du propergol final est contrôlée.

Un pays qui cherche à se doter d'une capacité locale de production de propergols a plusieurs options. Le pays peut acheter la technologie comme une opération clé en main à un tiers. Le pays peut tirer parti des connaissances existantes dans le cas de l'expérience de l'industrie chimique ou pétrolière et engager des consultants ayant l'expertise nécessaire pour modifier l'équipement de production de propergols. Une troisième option consisterait à envoyer du personnel technique suivre une formation dans d'autres pays afin d'acquérir les connaissances nécessaires pour soutenir le processus à partir de zéro.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cette technologie est employée pour produire du propergol utilisé pour propulser des missiles.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine):** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

Catégorie II - Article 5 -  
Réservé pour une utilisation  
future

Catégorie II - Article 6:  
Production de structures  
composites, dépôt pyrolitique  
et densification, et matières  
de structure

## Catégorie II - Article 6: Production de structures composites, dépôt pyrolytique et densification, et matières de structure

## 6.A. Équipement, assemblages et

## 6.A.1. Structures composites, stratifiés et leur fabrication, spécialement conçus aux fins de leur «utilisation» dans

- |                  |                        |
|------------------|------------------------|
| • Chine          | • Danemark             |
| • France         | • Allemagne            |
| • Israël         | • Inde                 |
| • Japon          | • Fédération de Russie |
| • Afrique du Sud | • Suède                |
| • Royaume Uni    | • États-Unis           |

## Production globale



**Nature et But:** Les composites et les stratifiés sont utilisés pour fabriquer des pièces de fusées et de véhicules aériens sans pilote (UAV) qui sont souvent plus légères, plus solides et plus durables que les pièces en métal ou autres matériaux.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les composés et les stratifiés sont généralement utilisés dans les composants structuraux critiques des missiles balistiques ou des véhicules aériens sans pilote (UAV), y compris des missiles de croisière. Les utilisations incluent les enveloppes solides de moteur de fusée, les interétages, les ailes, les admissions, les tuyères, les boucliers thermiques, les pointes avant, les pièces structurales et les armatures.

**Autres usages:** Les structures composites peuvent être formées dans presque n'importe quelle forme pour répondre aux besoins requis. Elles peuvent augmenter la vitesse de fabrication du produit et permettre une plus grande flexibilité dans la configuration du produit final. Les composites peuvent être fabriqués pour fournir une résistance directionnelle là où c'est nécessaire tout en réduisant le poids par rapport à leurs équivalents en métal. Ils sont utilisés dans les avions civils et militaires, comme blindage pour les véhicules militaires, dans les produits récréatifs (skis, raquettes de tennis, bateaux et clubs de golf), les pièces automobiles, les ordinateurs portables, les Smart Phones et les infrastructures (réparation de ponts et renforcement en béton).

**Aspect (sortie d'usine):** Les composites prennent la forme de l'objet, du mandrin ou du moule sur lequel ils sont formés. Le renfort utilisé pour la fabrication d'un composite donne souvent un motif de type textile à la surface de l'objet, surtout lorsqu'on utilise un tissu pré-imprégné. Même lorsque le tissu n'est pas utilisé, le motif linéaire du ruban peut être encore présent. Les peintures et les enduits gélifiés peuvent parfois masquer ce motif.

**Aspect (à l'emballage):** Les structures composites sont emballées comme les autres structures, avec de la mousse ou d'autres matériaux pour les protéger des abrasions extérieures ou des déformations dues aux contraintes.



- 6.A.2. Composants pyrolysés resaturés (c'est-à-dire carbone-carbone) ayant toutes les caractéristiques suivantes:
- Conçus pour les systèmes de fusée; et
  - Utilisables dans les systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A.1.

- France
- Inde
- Japon
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

### Production Globale



**Nature et But:** Le carbone-carbone est un composé de fibre de carbone, généralement fait à partir du pas, du rayon, ou du polyacrylonitrile (PAN), dans une matrice à dominance carbone. Il est généralement fait en employant une résine à haute teneur en carbone comme matrice initiale et puis en éliminant les éléments non-carbones par une chaleur élevée. Il est léger, fortement thermorésistant, résistant aux chocs thermiques et malléable pour la prise de forme.

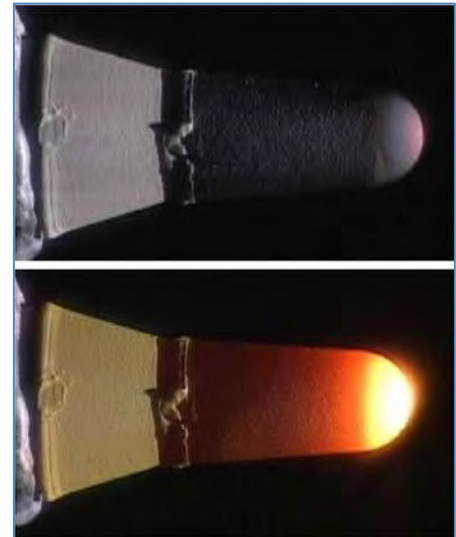
**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les matériaux en carbone-carbone sont employés pour les articles tels que les cônes et les tuyères de sortie de moteur de fusée et les pointes avant de corps de rentrée (RV), les boucliers thermiques et les bords d'attaque des gouvernes qui doivent résister aux effets des températures et de l'ablation. Le Schéma 60 montre les résultats d'un essai au propulseur électrothermique à arc de 300

secondes sur une ogive en carbone-carbone enduite du silicone- carbure en couches. Aucun changement de masse ou de dimension de la structure de l'ogive n'était évident après exposition aux températures externes.

**Autres usages:** Les structures carbone-carbone sont utilisées dans les applications aéronautiques militaires et civiles, telles que les sabots de frein haute température, et dans d'autres applications nécessitant une grande résistance et un poids réduit, comme les emplantures des ailes. Elles peuvent également être utilisées pour des outillages nécessitant une longue durée de vie dans des environnements de fabrication sévères, généralement à haute température, tels que les poches de coulée pour l'acier, les réchauffeurs pour les fours à haute température, les outils de maintenance du verre chaud et les outils de presse à chaud.

**Aspect (sortie d'usine):** Les matériaux de carbone-carbone typiques conçus pour les systèmes de fusée sont noirs et ont une surface modelée en raison du renfort textile. Les pointes avant et les tuyères de fusée sont généralement usinées à partir de blocs ou de billettes ou elles peuvent être tissées selon une forme.

**Aspect (à l'emballage):** Avant l'usinage, des blocs de matériau carbone-carbone sont suffisamment rugueux pour être emballés dans le remplisseur et expédiés dans des boîtes en carton. Les pièces usinées exigent un emballage soigneux parce que, bien qu'elles soient résistantes à la casse (résistantes aux chocs), elles peuvent facilement être enfoncées ou éraflées.



**Schéma 60:** Les effets des hautes températures sur un cône d'ogive en carbone-carbone sont montrés après 15 secondes (image supérieure) et 295 secondes. (Solutions de matériaux avancés d'ultramet)

## 6.B. Équipement d'essai et de production

6.B.1. Équipements pour la «production» de structures composites, de fibres, de préimprégnés ou de préformés, utilisables dans les systèmes mentionnés par les articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2, comme suit, et leurs composants et accessoires spécialement conçus:

a. Machines pour le bobinage de filaments ou machines pour le placement de fibres dont les mouvements de mise en position, d'enroulement et de bobinage de la fibre peuvent être coordonnés et programmés selon trois ou plus de trois axes, spécialement conçues pour fabriquer des structures ou des produits stratifiés composites à partir de matériaux fibreux ou filamenteux, et commandes de programmation et de coordination;

- |               |                        |
|---------------|------------------------|
| • France      | • Allemagne            |
| • Italie      | • Japon                |
| • Pays-Bas    | • Fédération de Russie |
| • Royaume Uni | • États-Unis           |

### Production globale



**Nature et But:** Les enrouleuses de filaments et les machines de placement de fibres et de remorquage posent des fibres ou des remorques enduites d'une résine époxy ou polyester sur des mandrins rotatifs selon des modèles prescrits pour créer des pièces composites à rapport résistance/poids élevé. Les enrouleuses de filaments ressemblent et fonctionnent un peu comme un tour. Les machines de placement de fibres et de remorquage sont disponibles dans de nombreuses configurations différentes qui incluent des portiques, des colonnes ou des robots en fonction de la taille et de la complexité géométrique de la pièce. Une fois l'opération d'enroulement terminée, la pièce a besoin d'une certaine forme de durcissement pour

polymériser l'époxy ou le système de résine. Le durcissement s'effectue dans un four, un autoclave ou un hydroclave.

**Mode de fonctionnement:** Les machines d'enroulement de filaments et les machines de placement de fibres et de remorquage nécessitent toutes deux des mandrins pour former la géométrie appropriée à la pièce à créer. Pour l'enroulement filamentaire, le mandrin est monté sur la machine et tourné. Au fur et à mesure qu'il tourne, il tire la fibre continue des bobines d'alimentation sur la surface extérieure du mandrin selon un motif précis. La fibre continue peut être pré-imprégnée ou étirée à travers un bain de résine époxy ou polyester. Pour la mise en place de la fibre ou de la remorque, le mandrin peut tourner ou être dans une position fixe. La tête de la machine de mise en place des fibres ou de la remorque dépose sur le mandrin des " bandes de filaments " de résine pré-imprégnées ou sèches provenant des bobines tout en appliquant chaleur et pression. Contrairement à la machine d'enroulement filamentaire, les " bandes de filament " sont souvent coupées à une position prédéterminée en fonction de la géométrie de la pièce. Après le bobinage, le mandrin et la pièce qui s'y est accumulée sont retirés de la machine et la pièce est durcie avant que le mandrin ne soit retiré. Les types de mandrins les plus courants sont les mandrins hydrosolubles pour araignée/plâtre et les mandrins segmentés et repliables. Les grandes enveloppes de moteur pour les moteurs solides de fusée sont généralement fabriquées sur les mandrins hydrosolubles en sable. On peut également utiliser des revêtements inamovibles. Par exemple, des récipients sous pression à revêtement métallique sont fabriqués en employant un revêtement en métal comme mandrin, qui est simplement laissé à l'intérieur de l'enveloppe enroulée.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les machines d'enroulement de filaments et les machines pour le

placement de fibres sont utilisées pour fabriquer des enveloppes de moteur de fusée, des réservoirs à propergol, des cuves sous pression et des montures de charge utile. La haute résistance et le faible poids des structures obtenues permettent d'obtenir des portées de missile et des taux de charge utile plus importantes.

**Autres usages:** Les machines d'enroulement de filaments et les machines pour le placement de fibres sont utilisées pour produire des pièces d'avions comme les stabilisateurs de queue, les pièces d'ailerons et le fuselage. Elles peuvent être employées pour fabriquer des réservoirs à gaz naturel liquides, des réservoirs à eau chaude, des réservoirs à gaz naturel comprimés, des axes de club de golf, des raquettes de tennis et des cannes à pêche.

**Aspect (sortie d'usine):** La taille des machines d'enroulement de filaments et des machines de placement de fibre varie selon la taille de la pièce à faire. Les enrouleurs de filaments utilisés pour fabriquer des pièces d'un diamètre de 10 cm mesurent environ 1 m x 2 m x 7 m et peuvent être installés sur un dessus de table. Les enrouleurs pour grands composants, comme les grands segments de moteur de fusée, sont d'un diamètre d'environ 3 m et d'une longueur de 8 m et pèsent plusieurs tonnes (Schéma 61). Les machines d'enroulement avancées sont contrôlées numériquement par ordinateur et peuvent enrouler des formes complexes pour répondre à des exigences particulières.



Schéma 61: *Gauche:* Une enveloppe de graphite époxyde produite à l'aide d'une machine d'enroulement de filaments avancée. (ATK) *Centre:* Machine de table d'enroulement de filaments (Thiokol Corp.) *Droite:* Une machine d'enroulement de filaments avec de multiples bobines de fibre. (Ibid)

**Aspect (à l'emballage):** La taille des machines de bobinage de filaments détermine leur conditionnement. Les machines plus petites sont mises en caisse dans des conteneurs amortisseurs ou attachées à des palettes rembourrées isolées des autres emballages. Les machines plus grandes sont démontées pour l'expédition et remontées sur place et leurs composants sont emballés séparément dans des caisses ou des palettes.

6.B.1.b. Machines pour la pose de bandes dont les mouvements de mise en position et de pose de bandes ou de feuilles peuvent être coordonnés et programmés selon deux ou plus de deux axes, conçues pour la fabrication de structures composites pour cellules d'avions ou de missiles;

Note:

Aux fins des articles 6.B.1.a et 6.B.1.b, les expressions ci-après sont définies comme suit:

1. Une «bande de filaments» est une largeur continue unique de ruban, de câble ou de fibre entièrement ou partiellement imprégnés de résine. Les «bandes de filaments» entièrement ou partiellement imprégnées de résine comprennent les bandes revêtues de poudre sèche qui se collent à la chaleur.

2. Les «machines de pose de fibres ou de remorquage» et les «machines de pose de bandes» sont des machines qui exécutent des processus similaires utilisant des têtes guidées par ordinateur pour poser une ou plusieurs «bandes filamentaires» sur un moule afin de créer une pièce ou une structure. Ces machines ont la capacité de couper et de redémarrer des bandes de filaments individuelles pendant le processus de pose.

3. Les «machines de pose de fibres ou de remorquage» ont la capacité de placer une ou plusieurs «bandes de filaments» d'une largeur inférieure ou égale à 25,4 mm. Il s'agit de la largeur minimale du matériau que la machine peut placer, quelle que soit la capacité supérieure de la machine.

4. Les «machines à poser les rubans» peuvent placer une ou plusieurs «bandes de filaments» d'une largeur inférieure ou égale à 304,8 mm, mais ne peuvent pas placer de «bandes de filaments» d'une largeur égale ou inférieure à 25,4 mm. Il s'agit de la largeur minimale du matériau que la machine peut placer, quelle que soit la capacité supérieure de la machine.

- France
- Italie
- Pays-Bas
- Royaume Uni
- Allemagne
- Japon
- Fédération de Russie
- États-Unis

## Production globale



**Nature et But:** Les machines de pose de rubans existent dans de nombreuses tailles et configurations. Les machines utilisées pour la fabrication des cellules d'avions et des structures de missiles ressemblent à des fraiseuses de type portique. Plutôt que d'enlever le matériau, ils placent des "bandes de filaments" sur un mandrin. Les pièces susceptibles d'être utilisées sur ces machines ont des contours ou des angles suffisamment graduels pour permettre l'utilisation de "bandes de filaments" épaisses ou larges. Ces machines se distinguent des machines de placement de fibres et de remorquage par la complexité géométrique des pièces produites; des machines de

placement de fibres et de remorquage sont nécessaires lorsque les pièces ont des surfaces très concaves ou convexes et des zones mélangées où des "bandes filamentaires" plus étroites doivent être placées.

**Mode de fonctionnement:** Les machines à poser les bandes fonctionnent en plaçant des "bandes de filaments" unidirectionnelles de préimprégnés sur un mandrin qui définit la forme de la pièce à fabriquer. Contrairement aux machines d'enroulement filamentaire, ces "bandes de filament" sont coupées pendant le processus de stratification à des points prédéfinis, généralement entraînés par la géométrie de la pièce ou les exigences de conception. Les structures à faible courbure utilisent des rubans adhésifs de plus grande largeur (jusqu'à environ 30 cm). Les structures de courbure modérée à grande utilisent des rubans adhésifs dans des largeurs plus petites ou les appliquent en biais par rapport à la direction principale de courbure.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les machines à poser des rubans sont utilisées pour fabriquer des boucliers thermiques, des surfaces de contrôle, des cloisons entre étages et d'autres revêtements à courbure modérée qui ne sont pas des corps de révolution.



**Autres usages:** Les machines de pose de rubans sont largement utilisées dans l'industrie aérospatiale militaire et commerciale pour les revêtements d'ailes et les sections de fuselage où l'orientation précise des "bandes de filaments" est requise pour la résistance et la sécurité. Les pièces ont tendance à être grandes et plates ou à courbure modérée.



Schéma 62: Une tête de machine de pose de ruban automatisée. (Dynamique automatisée)

**Aspect (sortie d'usine)** La taille des machines de pose de ruban varie selon la taille des pièces exigées. Les machines sont assistées par opérateur ou bien contrôlées numériquement par ordinateur (CNC). Les machines de CNC ont un clavier afin de pouvoir entrer les données pour l'empilage souhaité. La plateforme, qui est le dispositif dominant de la machine, mesure de 1 à 2 m de long pour la fabrication de petites pièces et jusqu'à 10 m pour les très grandes pièces. Le poids de grandes machines avec une table et un portique en acier peut atteindre 1000 à 2000 tonnes métriques. Un exemple de machine pour la pose de bande est montré sur le schéma 62.

**Aspect (à l'emballage):** La taille des machines de pose de rubans détermine leur conditionnement. Les machines plus petites sont mises en caisse dans des conteneurs amortisseurs ou attachées à des palettes rembourrées isolées des autres emballages. Les machines plus grandes sont démontées pour l'expédition et remontées sur place et leurs composants sont emballés séparément dans des caisses ou des palettes.

6.B.1.c. Machines de tissages multidirectionnel/multidimensionnel ou machines à entrelacer, y compris les adaptateurs et les ensembles de modification, pour tisser, entrelacer ou tresser les fibres en vue de la fabrication de structures composites;

**Note:**

*L'article 6.B.1.c. ne vise pas les machines textiles qui n'ont pas été modifiées en vue des utilisations finales susmentionnées.*

- France
- Allemagne
- Japon
- Pays-Bas
- États-Unis

- Dans de nombreux pays, il est possible d'acheter des machines textiles qui ne sont pas contrôlées et facilement

Production globale



**Nature et But:** Les machines de tissage multidirectionnelles et multidimensionnelles sont utilisées pour relier les fibres afin de réaliser des structures composites complexes. Les machines de tressage constituent une méthode générale de production de préformes multidirectionnelles de matériaux. L'objectif est de déposer systématiquement les fibres le long des lignes de contrainte prévues dans des configurations de préformes complexes, rendant ainsi les pièces plus solides et plus légères qu'elles ne le seraient autrement.

Les machines de tissage exigent des mécanismes de manipulation complexes pour relier des fibres, avec des mécanismes de bobines et de rotation/mouvement intégrés à chaque machine. Certaines machines, dont celles utilisées pour des boucliers thermiques de corps de rentrée en particulier, sont montées sur une plateforme et nécessitent des tiges rigides dans au moins un sens pour stabiliser la géométrie du tissage. Pour des machines de tissage utilisées pour fabriquer des préformés polaires tridimensionnelles (3D),

la construction de réseau de base requise pour faire le tissage comprend des plaques percées avec les modèles de trou, plaques plates, tiges métalliques, aiguilles de tricotage, lames de rétraction spécialement conçus et, si le processus est entièrement automatisé, les machines requises pour actionner les aiguilles de tricotage et les lames de rétraction. Les sous-éléments pour d'autres types de tissage dépendent de la conception spécifique de la machine.

**Mode de fonctionnement:** Dans un système, un mandrin de tissage est d'abord installé sur la machine. Au fur et à mesure que le mandrin tourne, les fibres circonférentielles sont posées en continu sur le lieu de tissage par un système tubulaire de distribution des fibres, qui comprend des dispositifs de tension des fibres et des capteurs à fibres manquantes. A chaque couloir en forme de tarte formé par le réseau de tissage, une aiguille à tricoter radiale traverse le couloir, capture une fibre radiale à l'intérieur de l'orifice et retourne à l'extérieur de l'orifice, où elle fait un point de blocage qui empêche le mouvement de la fibre radiale lors des opérations ultérieures. Ce processus est poursuivi et complété par le laçage final.

Les machines à tresser entrelacent deux ou plusieurs systèmes de fibres dans le sens de la polarisation pour former une structure intégrée au lieu de les lacer uniquement dans le sens longitudinal comme dans le tissage. Ainsi, la matière tressée diffère des tissus tissés et tricotés par la méthode par laquelle la fibre est introduite dans le tissu et par la manière par laquelle les fibres sont entrelacées.



**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les machines à tisser multidirectionnelles et multidimensionnelles sont utilisées pour fabriquer des pièces critiques de missiles telles que les pointes de nez de RV, les boîtiers de moteurs fusée et les tuyères de fusée qui sont exposées à des températures élevées et à des contraintes.

**Autres usages:** Les machines à tisser sont utilisées pour fabriquer une large gamme de pièces composites complexes telles que les hélices d'avion, les longerons d'éolienne, les skis, les poteaux électriques et les articles sportifs.

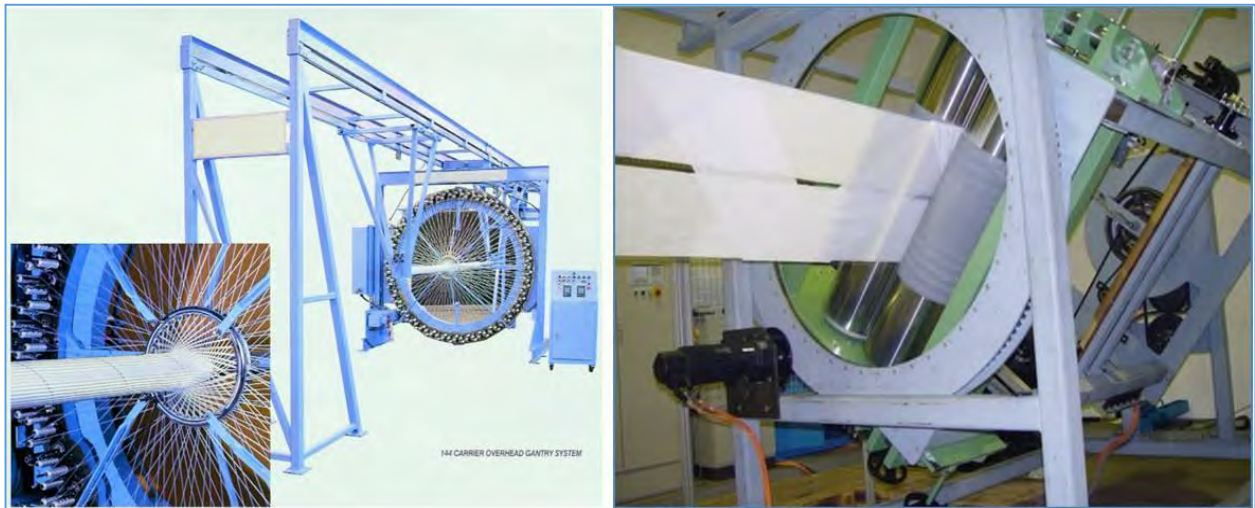


Schéma 63: *Gauche:* Une machine aérienne de tissage de portique à 144 porteurs. (Wardwell Braiding Machine Co.) *Droite:* Prototype d'une machine de tissage orientable en cours de développement. (MD Fibertech Corp)

**Aspect (sortie d'usine):** Une machine de tissage possède une zone de travail sur une table tournante avec un réseau de tiges pénétrant des plaques percées autour desquelles la fibre est tissée. La zone de travail est entourée de distributeurs de fibres en bobines et d'aiguilles de tissage et de laçage. Les moteurs d'entraînement, les cames et les tiges de poussée qui font le tissage sont également montés sur le châssis principal de la machine.

Les machines à tisser utilisées pour fabriquer de petites pièces peuvent mesurer 2 m de longueur et 1 m de largeur. Celles utilisées pour fabriquer de grandes pièces peuvent avoir une longueur de 10 m si elles sont disposées horizontalement ou une hauteur de 10 m si elles sont disposées verticalement. Les machines à tresser peuvent être montées au sol ou être équipées d'un portique aérien supportant la broche sur laquelle la préforme est fabriquée. Dans l'une ou l'autre configuration, la fibre est amenée vers l'axe radialement à travers une grande roue centrée sur l'axe. Le panneau de commande est situé au centre du portique afin de surveiller le développement des préformes.

**Aspect (à l'emballage):** L'emballage des machines à tisser dépend de leur taille. Les machines plus petites peuvent être entièrement emballées dans des caisses d'emballage. Les composants des machines plus grandes sont démontés pour l'expédition et remontés sur place et leurs composants sont emballés séparément dans des caisses ou des palettes. Il est probable qu'une grande caisse contienne le châssis de la machine. Tous les composants sont convenablement protégés contre les chocs et les vibrations pendant le transport et la manutention.

6.B.1.d. Équipement conçu ou modifié pour la production de matériaux fibreux ou filamenteux, comme suit:

1. Équipements pour la transformation de fibres polymères (telles que polyacrylonitrile, rayonne ou polycarbosilane), y compris le dispositif spécial pour la tension du fil au cours du chauffage;

- Allemagne
- Japon
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Les fibres polymères sont les précurseurs de la fabrication des fibres de carbone et de céramique. La qualité de ces précurseurs influe directement sur les propriétés des matériaux et la variation du rendement du produit final. La conversion d'un polymère en une fibre de carbone ou de céramique s'effectue par chauffage et étirage du précurseur dans une atmosphère contrôlée. L'équipement contrôlé sous cette section chauffe, étire et contrôle l'atmosphère dans laquelle la fibre est traitée.

**Mode de fonctionnement:** Le procédé général de fabrication de la fibre de carbone à partir de polyacrylonitrile (PAN) est le suivant.

La fibre PAN des bobines est chargée dans un cantre qui alimente la ligne de production. La fibre polymère est étalée à plat en formant une bande ou une feuille de remorquage avant d'entrer dans les fours d'oxydation. La réticulation des chaînes polymères commence à cette étape. La densité de la fibre augmente et la teneur en carbone est de 50 à 65 pour cent. Ensuite, la carbonisation a lieu dans des fours à haute température qui fournissent une atmosphère inerte (azote ou argon) pour empêcher l'oxygène de dégrader la fibre. Lorsque la fibre passe dans ces fours, elle perd du poids et du volume. Selon le nombre de fours de carbonisation et la température d'exposition finale, la teneur en carbone de la fibre peut varier entre 93 et 99 %. Tout au long du processus, la tension ou l'étirement de la fibre est critique pour les propriétés mécaniques du produit final.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'équipement est utilisé pour convertir et filtrer les fibres polymères afin de produire des fibres utilisées dans les applications de missiles où une grande résistance et un faible poids sont primordiaux. Ces fibres sont utilisées dans les missiles pour améliorer la résistance de l'enveloppe moteur, du carénage et du réservoir de propergol tout en réduisant le poids et en augmentant ainsi la portée et la capacité de charge utile du missile.

**Autres usages:** L'équipement est utilisé pour convertir les fibres polymères pour de nombreuses utilisations, y compris les structures d'aéronefs, les pneus, les clubs de golf et les coques de bateaux.

**Aspect (sortie d'usine)** Il est difficile de décrire l'apparence de l'équipement utilisé pour convertir les fibres polymères en raison de la variété des configurations possibles de l'équipement. L'agencement est généralement adapté au bâtiment de production et couvre une surface de sol considérable. Les éléments les plus remarquables sont les nombreux rouleaux de précision et leurs mécanismes de contrôle. Les rouleaux font généralement de 8 cm à 20 cm de diamètre par 30 cm à 120 cm de long, avec leurs dimensions en fonction des fours dans lesquels ils sont destinés à être utilisés. Des rouleaux d'entraînement sont utilisés pour tirer lentement la fibre précurseur à travers un four sous tension contrôlée. Les rouleaux d'entraînement sont généralement fabriqués en acier inoxydable poli ou en acier chromé et sont soit entraînés de manière à maintenir les filaments à une tension constante, soit

entraînés à une vitesse préprogrammée pour allonger les filaments dans le cadre du processus. Ainsi, les rouleaux peuvent être entraînés par des moteurs individuels sur leurs arbres ou proportionnellement par des engrenages d'un arbre entraîné par un moteur.

La machine est conçue pour permettre à la fibre de passer plusieurs fois dans la zone chauffée avec un contrôle précis de sa vitesse, de la température dans chaque zone du four, et de la tension sur la fibre. La fibre doit passer à travers plusieurs de ces fours car le procédé exige une grande variété de réactions différentes. Un système typique de four d'étirage de fibres présente de nombreux rouleaux et des zones de chauffage isolées dans le four. La taille de l'équipement varie considérablement.

Généralement, les fours de traitement vertical sont utilisés pour le traitement thermique à haute température. Cependant, les divers traitements requis pour produire une fibre de carbone ou une autre fibre réfractaire à partir d'une fibre polymère exigent que plusieurs pièces d'équipement soient utilisées. Parmi les exigences typiques figurent les fours à basse température avec des systèmes de manutention textile critiques et les fours à haute température avec une capacité de manutention des fibres pour la conversion de la fibre à son état final.

**Aspect (à l'emballage):** Les fours, les fourneaux et l'équipement de transformation nécessaires à la production de fibres de carbone varient en fonction de leur taille, de leur poids et de leur sensibilité aux facteurs environnementaux. En général, les versions de laboratoire de l'équipement peuvent être entièrement mises en caisse et expédiées par train ou par camion. Les fours de plus grande taille conçus pour un usage commercial doivent généralement être expédiés en unités composées et assemblés sur place. Cependant, certains des fours peuvent être d'un tel diamètre qu'ils doivent être spécialement manipulés comme une cargaison surdimensionnée. Le poids de ces grands fours avoisine les 1 000 tonnes métriques ou plus.

6.B.1.d.

2. Équipements pour le dépôt en phase vapeur d'éléments ou de composés sur des substrats filamenteux chauffés

- Allemagne
- Japon
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

Production  
Globale



**Nature et But:** L'équipement pour le dépôt en phase vapeur applique un revêtement d'interface très mince sur les filaments. Ces revêtements d'interface modifient les propriétés des filaments. Les revêtements métalliques sont conducteurs et ajoutent une résistance à l'abrasion; certains revêtements céramiques protègent les fibres de la réaction avec l'atmosphère ou les matériaux adjacents. Les revêtements peuvent également améliorer la compatibilité éventuelle des fibres avec un matériau matriciel, comme c'est le cas pour certains composites à matrice métallique.

**Mode de fonctionnement:** Cet équipement fournit un environnement sous vide partiel approprié pour la condensation ou le dépôt d'un revêtement sur filaments. Le procédé de dépôt

en phase vapeur présente plusieurs variations; deux des procédés de base les plus importants sont le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et le dépôt physique en phase vapeur (PVD).

Le processus CVD dépose des revêtements inorganiques solides à partir d'un gaz de réaction ou de décomposition à une température élevée. Parfois, ce processus se produit dans un plasma généré par radiofréquence pour assurer l'uniformité thermique et améliorer la qualité des revêtements CVD dans un procédé appelé CVD assisté par plasma (PACVD). Les processus PVD utilisent la pulvérisation cathodique, l'évaporation et le placage ionique pour déposer le revêtement sur les filaments. L'équipement pour les PVD est similaire à l'équipement pour les CVD, sauf que la chambre n'a pas besoin de fonctionner à une température élevée et ne nécessite pas d'alimentation en gaz réactif.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'équipement pour le dépôt des éléments sur les filaments chauffés produit des fibres utilisées dans des tuyères de moteur de fusée et des nez de pointe avant des corps de rentrée.

**Autres usages:** Cet équipement enduit les fibres utilisées dans les avions à réaction. Le PACVD est actuellement une technique importante pour la fabrication de couches minces dans l'industrie de la microélectronique et a été appliqué à l'enduit continu de fibres de carbone.

**Aspect (sortie d'usine):** Les configurations de chambre CVD et PVD varient considérablement. Certaines sont de longs tubes avec des joints à chaque extrémité qui permettent le passage des filaments mais pas des gaz. D'autres sont de grandes chambres, de 2 à 3 m d'un côté, avec assez de place pour contenir les bobines de filament, l'équipement de guidage de filament comprenant les rouleaux de propagation et de tension, une zone chaude si nécessaire et les gaz réactants. En raison de cette variation, les seules pièces normalisées et aisément reconnaissables de cet équipement sont le système d'alimentation en gaz, une importante alimentation électrique, des pompes de vide et probablement l'instrumentation qui contrôle la température. Dans tous les cas, l'alimentation électrique est de taille et de poids importants, en général de plus 0,6 m X 0,9 m X 1,5 m avec des entrées d'eau pour le refroidissement, le pompage et des arrêts de sécurité. L'équipement de PACVD ressemble à un système conventionnel de CVD ou de PVD sauf qu'il a une alimentation d'énergie de radiofréquence (RF) pour produire le plasma.

**Aspect (à l'emballage):** L'emballage varie selon la taille, le poids et la sensibilité aux facteurs environnementaux. En général, les versions de laboratoire de l'équipement peuvent être entièrement mises en caisse et expédiées par train ou par camion. Cependant, même les versions de laboratoire ont généralement des composants emballés séparément de sorte que les bobines de textile, les moteurs et les articles en verre spéciaux puissent être correctement protégés. Les plus grands systèmes conçus pour usage commercial sont généralement expédiés comme sous-ensembles ou composants partiellement assemblés et assemblés sur place.

#### 6.B.1.d.

#### 3. Équipements pour l'extrusion par voie humide de céramique réfractaire (telle que l'oxyde d'aluminium)

**Nature et But:** L'équipement de filage par voie humide est utilisé pour produire de longs filaments à partir d'un mélange de liquides et de solides. Ces filaments sont ensuite traités pour produire des filaments céramiques à haute résistance et à haute température pour les composites céramiques ou à matrice métallique.

**Mode de fonctionnement:** Dans le filage humide des céramiques réfractaires, une suspension de particules fibreuses est traitée physiquement et chimiquement et est aspirée dans un filament par un orifice appelé filière. La chambre dans laquelle les filaments sont créés tourne ou renferme un dispositif de mélange interne, l'un ou l'autre de ces dispositifs produisent le tourbillon dans lequel le filament s'emmêle. Le matériau émerge de la filière et se solidifie sous l'effet de la température ou d'un changement chimique, selon le système de liant utilisé dans le bain humide qui entoure la filière. Le bain soutient et stabilise les filaments produits lors du refroidissement.

- Allemagne
- Japon
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

Production  
globale



**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'équipement de filature par voie humide est utilisé pour fabriquer des fibres céramiques de haute qualité pour les pointes de nez de missiles et les tuyères de moteurs fusée. Ces fibres sont également utilisées pour fabriquer certaines pièces de statoréacteurs et de turboréacteurs applicables aux missiles de croisière.

**Autres usages:** L'équipement de filature par voie humide est utilisé pour fabriquer des fibres céramiques destinées à la fabrication de pièces de moteurs de petites turbines à gaz, de réservoirs de traitement chimique et d'applications structurales à haute température. Les fibres céramiques ou les filaments peuvent être

combinés avec d'autres matériaux composites pour améliorer la résistance et la résistance à la chaleur dans de nombreux produits commerciaux.

**Aspect (sortie d'usine)** La chambre de réaction chimique cylindrique est l'un des principaux composants de l'équipement de filage par voie humide. Bien que la verrerie soit acceptable pour les équipements de filature par voie humide de laboratoire et prototypes, des chambres de réaction en acier inoxydable ou revêtues de verre sont utilisées pour les équipements de qualité production. Typiquement, la chambre est orientée verticalement et effilée vers le bas, là où se trouvent les matrices qui extrudent les filaments.

Les autres équipements associés à la chambre de réaction chimique comprennent un récipient cylindrique (beaucoup plus long que son diamètre) qui contient la boue chimique à partir de laquelle le filament est produit; un manomètre et une conduite d'échappement des gaz fixée au récipient; un ensemble de tubes contenant des sections de tubes de verre fixes et rotatifs; un robinet à bille relié au tube de verre fixe; un moteur et un contrôleur pour entraîner le tube rotatif; un rouleau amortisseur et un enrouleur pour les fils finis.

**Aspect (à l'emballage):** L'emballage est représentatif de tout équipement industriel de taille similaire. En général, les versions de laboratoire entièrement assemblées de l'équipement peuvent être mises en caisse et expédiées par train ou par camion. Les composants d'équipement de plus grande taille destinés à un usage commercial sont expédiés dans des boîtes ou des caisses séparées et assemblés sur place.



6.B.1.e. Équipements spécialement conçus ou adaptés pour le traitement de la surface des fibres ou pour la réalisation des préimprégnés et des préformés, notamment des rouleaux, tendeurs, matériels de revêtement, matériels de coupe et matrices «clickers».

- France
- Allemagne
- Suède
- Suisse
- Royaume Uni
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Les équipements de traitement de surface et de préimprégnation des fibres sont utilisés pour préparer les fibres en vue de la fabrication de matériaux composites de haute qualité. Les traitements de surface améliorent l'adhérence en augmentant la surface de la fibre; le préimprégné ajoute suffisamment de résine à la fibre (ou aux filaments, mèche ou ruban) pour la durcir en un composite.

**Mode de fonctionnement:** Les filaments de fibres, le stratifil ou les rubans à traiter dans un équipement de traitement de surface passent par une série de bains électrochimiques ou électrolytiques composés de réactifs liquides pour les graver, les rendre rugueux et ajouter les groupes chimiques réactifs. Après le traitement de surface, un enduit spécial appelé encollage est appliqué sur les filaments de la fibre qui la protège pendant la manipulation

et les opérations de post-dimensionnement telles que le tissage. Les matériaux sont introduits sur des rouleaux à travers un bain de réactifs en une simple opération de trempage. Le nombre et la vitesse des rouleaux dans le bain déterminent la durée de gravure de la pièce ou la quantité d'encollage conservée. Les réchauffeurs sont utilisés pour modifier la réactivité du système de gravure, pour contrôler la viscosité du bain de collage, pour favoriser les réactions chimiques qui rendent le collage stable et pour sécher le produit.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cet équipement est utilisé pour le traitement de surface de diverses fibres utilisées dans la fabrication de pièces de missile afin d'améliorer le liant et donner la force additionnelle aux composants de missile tels que les nez de pointe avants, les enveloppes de moteur et des tuyères d'échappement.

**Autres usages:** Cet équipement est identique à celui utilisé pour fabriquer les fibres pour toutes les applications commerciales de la technologie composite, des coques de bateaux aux clubs de golf.

**Aspect (sortie d'usine):** Un banc de laboratoire avec de petits rouleaux et des pistolets chauffants est le seul équipement nécessaire pour traiter ou préimprégner la fibre sur une base prototype. Pour l'activité au niveau de la production, l'équipement de manutention textile est beaucoup plus grand, de sorte que plusieurs lignes peuvent être traitées en même temps. Le processus peut aussi impliquer des empilements de réchauffeurs de plusieurs étages de hauteur. Tous les systèmes sont équipés de rouleaux pour maintenir la matière textile en mouvement, maintenir la tension sur la fibre et presser l'excès de liquide, ainsi que d'un four avec une trajectoire complexe sur les rouleaux pour que les filaments traversent plusieurs fois le four.



**Aspect (à l'emballage):** L'emballage de l'équipement, à l'exception des petits appareils de laboratoire, exige habituellement que les composants soient expédiés séparément et assemblés sur place. Cela est dû au fait que le fond, les cuves de stockage des produits chimiques et les appareils de manutention textile nécessitent différents types de protection des emballages. Les cuves pour produits chimiques peuvent être conditionnées dans de simples boîtes en carton ondulé, mais les rouleaux, qui ont une finition de surface précise ou spéciale pour éviter d'endommager les filaments, doivent être amortis et montés rigidelement dans des caisses robustes. L'équipement de commande électrique, s'il est inclus, sera emballé comme les autres appareils électroniques fragiles.



Schéma 64: *Gauche:* Une machine de préimprégnation construite par le Composite Materials Group pour la production de matériaux préimprégnés employant des fibres et des résines. (Katholieke Universiteit Louvain) *droite:* Une machine ajoutant la résine à sept lignes de stratifié (Hunting Engineering, Ltd.)

**Note:**

*Les composants et accessoires des machines visées par l'article 6.B.1. comprennent notamment les moules, mandrins, matrices, montages et outils servant à ébaucher, polymériser, couler, fritter ou assembler les structures composites, les stratifiés et leurs produits manufacturés*

## 6.B.2. Tuyères spécialement conçues pour les procédés visés par l'article 6.E.3.

- France
- Allemagne
- Fédération de Russie
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Les tuyères pour dépôt pyrolytique dirigent un gaz n'ayant pas réagi sur une surface sur laquelle le dépôt est souhaité. Les tuyères doivent être mobiles ou placées de façon à pouvoir couvrir toute la surface d'un four CVD à haute température et pression.

**Mode de fonctionnement:** Les tuyères utilisées dans des fours de CVD fournissent un gaz froid et non réactif à la surface traitée. Le gaz doit être non réactif de sorte que l'enduit se produise sur la surface prévue plutôt que sur l'intérieur de la tuyère et aussi proche de la surface à traiter de sorte que la surface et non pas les murs du four soient pulvérisés. Une tuyère est comme un pistolet de pulvérisation

de peinture, elle doit être maintenue à proximité de la pièce étant peinte.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces tuyères sont des pièces nécessaires de l'équipement pyrolytique de dépôt utilisé pour faire les pièces fortement résistantes à la chaleur et critiques comme les tuyères de fusée, les inserts de gorge, et les nez de pointe avant de corps de rentrée.

**Autres usages:** Ces tuyères sont utilisées pour faire les pièces fortement résistantes à la chaleur pour les réacteurs.

**Aspect (sortie d'usine):** Les tuyères pour fours CVD sont conçues pour supporter des températures élevées dans les fours, soit du fait de leur construction en matériau résistant aux hautes températures comme le graphite, soit par refroidissement à l'eau. Les dimensions des tuyères représentent environ la moitié de la largeur du four. Les petites tuyères sont généralement fabriquées en graphite parce qu'elles sont peu coûteuses, faciles à remplacer et légères (environ 0,5 kg à 2,5 kg). Les tuyères plus grandes pour les fours de production sont souvent en métal, nécessitent un refroidissement par eau, peuvent avoir des brides de fixation intégrées et peuvent peser jusqu'à 25 kg.

Les tuyères sont fabriquées en différentes longueurs, qui dépendent de la taille du four et de la surface. Les tuyères refroidies à l'eau, plus grandes et plus complexes, mesurent jusqu'à 1,5 m de long, avec leur partie tubulaire de 20 cm de diamètre. Cependant, étant donné qu'une partie de la plupart des tuyères est conçue sur mesure, il n'y a pas de forme ou de taille standard.

**Aspect (à l'emballage):** L'emballage de la tuyère et de l'équipement de dépôt pyrolytique est adapté pour éviter d'endommager un tuyau très résistant avec des valves et raccords un peu fragiles. Généralement, plusieurs tuyères sont expédiées ensemble dans un emballage bien protégé, séparé de toute grande coque de four.

- 6.B.3. Presses isostatiques réunissant les deux caractéristiques suivantes:
- Une pression de travail maximale supérieure ou égale à 69 MPa;
  - Conçues pour atteindre et maintenir un environnement thermique contrôlé de 600 °C ou plus; et
  - Présentant une chambre d'un diamètre égal ou supérieur à 254 mm.

- France
- Allemagne
- Fédération de Russie
- États-Unis

Production  
globale



**Nature et But:** Les presses isostatiques sont utilisées pour infuser du carbone dans une préforme en carbone poreux d'une tuyère de fusée ou d'une pointe de nez de RV sous haute température et pression. Ce procédé, appelé densification, élimine virtuellement les vides dans la préforme et améliore les propriétés mécaniques et physiques de l'objet traité.

**Mode de fonctionnement:** L'objet à traiter est placé dans la chambre appropriée et descendu dans la zone chaude du four. Tous les raccordements d'eau et électriques sont effectués et tous les instruments du procédé sont raccordés avant que le couvercle ne soit abaissé dans le four et scellé. Au fur et à mesure que l'objet est chauffé, il

est soumis à des températures élevées jusqu'à ce que la densification appropriée soit atteinte. Les produits de réaction sont éliminés par la tuyauterie interne afin qu'ils n'entrent pas en contact avec les éléments chauffants.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les presses isostatiques sont utilisées dans la fabrication de pointes de nez pour les RV et d'inserts de tuyères pour les moteurs fusée.

**Autres usages:** Ces presses sont utilisées pour le collage par diffusion de métaux similaires, le collage par diffusion de métaux différents pour former des stratifiés (argent-nickel-argent-argent ou cuivre-inox), et la réalisation de joints sans soudure. Elles sont utilisées dans diverses applications de métallurgie des poudres. Elles sont également utilisées pour améliorer la qualité des pièces coulées et forgées en forçant hydrostatiquement les défauts à fermer et à coller.

**Aspect (sortie d'usine)** Des presses isostatiques destinées à la densification sont spécialement modifiées pour fonctionner lorsqu'une réaction de pyrolyse se produit. Un système de dimension laboratoire typique a trois composants principaux: une chambre de pression, un générateur d'air chaud interne, un système de traitement des gaz, des systèmes électriques et des systèmes auxiliaires. Le réservoir sous pression se compose habituellement d'un cylindre vertical à paroi épaisse et à fermeture amovible à haute pression, ou d'un bouchon, à l'extrémité supérieure ou inférieure (Schéma 65). Certaines presses sont équipées de réservoirs sous pression horizontaux.

Le four se trouve à l'intérieur du réservoir sous pression et fournit la chaleur et l'espace nécessaires au processus de densification. Les éléments chauffants en graphite, molybdène ou nickel/chrome sont utilisés pour chauffer la pièce par rayonnement direct ou pour chauffer le gaz inerte qui chauffe ensuite la pièce par convection.



Schéma 65: *Gauche*: Une presse isostatique de classe laboratoire. (ESPI) *Droite*: Une presse isostatique chaude de classe laboratoire. (Abra Fluid AG)

L'équipement de manipulation de gaz fournit le gaz inerte, généralement l'argon, pour appliquer une force uniforme sur la pièce à densifier. La pression du gaz est obtenue à l'aide d'un compresseur. Les pressions de fonctionnement peuvent varier de 10 MPa à 300 MPa.

Les systèmes électriques et auxiliaires comprennent un tableau de bord avec des instruments de contrôle et d'enregistrement de la température et de la pression caractéristiques de l'industrie. Un ordinateur permettant d'entrer les paramètres de processus nécessaires pour contrôler le fonctionnement de la presse est inclus.

La presse peut être entourée d'un écran absorbant l'énergie. Ce bouclier peut être conçu à l'usine où le système fonctionne et implique souvent l'installation de la chambre sous terre. Le réservoir sous pression est également muni d'une chambre d'isolement et d'une tuyauterie pour s'assurer que les gaz de la zone de traitement sont évacués de l'échappement et ne s'écoulent pas vers la zone de chauffage.



Schéma 66: *Gauche*: Vue de côté d'une grande presse isostatique. (Engineered Pressure Systems, Inc.) *Centre et droite*: Deux vues différentes d'une caisse d'expédition alternative pour une presse isostatique. (Engineered Pressure Systems, Inc.)



**Aspect (à l'emballage):** Les composants d'un système de presse isostatique sont susceptibles d'être expédiés séparément et assemblés sur le lieu de travail final. L'emballage varie selon les exigences de l'acheteur, mais les palettes et les caisses en bois avec bandes d'acier et renfort sont courantes. (Figure 66). Les plus grandes chambres sont très lourdes en raison des murs épais et elles peuvent être emballées dans une caisse en bois cylindrique avec des larges bandes en acier.

### 6.B.4. Fours pour le dépôt en phase vapeur par procédé chimique, conçus ou modifiés pour la densification des matières carbone.

- France
- Allemagne
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Les fours CVD pour infuser du carbone dans une préforme en carbone poreux d'une tuyère de fusée ou d'une pointe de nez de RV. Ce procédé, appelé densification, élimine virtuellement les vides dans la préforme et améliore les propriétés mécaniques et physiques de l'objet traité. Les propriétés finales des composites carbone-carbone dépendent fortement du type et de l'orientation des fibres de carbone dans la préforme et des paramètres de procédé utilisés pour la densification.

**Mode de fonctionnement:** Les fours de CVD emploient soit des processus isothermes soit des processus de gradient thermique pour la densification. L'objet à traiter est placé dans la chambre appropriée et abaissé dans la zone chaude du four.

Tous les branchements de gaz, d'eau et électriques sont établis et toute l'instrumentation de traitement est relié avant que le couvercle soit abaissé dans le four et scellé. Ensuite, le four est vidé de son air et chauffé à environ 1.000 °C. Puis, le gaz hydrocarbure, comme le gaz naturel ou le méthane, est introduit. Le gaz se diffuse dans la préforme, se sépare en molécules constitutives et dépose du carbone pyrolytique dans la préforme remplissant les vides. Le processus de chauffage et d'alimentation des gaz de dépôt est automatisé. Pour le procédé isotherme, les préformes sont maintenues à cette température uniforme pendant 30 à 40 jours jusqu'à ce que la densité et la porosité souhaitées du composite soient obtenues.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les fours CVD sont utilisés pour fabriquer des tuyères et des nez de fusées carbone-carbone. Les pièces carbone-carbone sont légères et résistantes, et peuvent augmenter les performances du système.

**Autres usages:** Les fours CVD sont utilisés dans le revêtement optique, la densification des matériaux de friction pour les systèmes de freinage aérospatiaux et les outils de coupe, le revêtement et le polissage de surfaces de précision et la fabrication de semi-conducteurs.

**Aspect (sortie d'usine):** Les fours CVD sont de grands fours cylindriques à double paroi et à fermeture étanche au gaz. Les fours CVD typiques sont grands parce qu'ils abritent une zone de chaleur interne, des appareils de chauffage électriques et de l'isolation. Les fours de moins de 1,5 m de hauteur et de 1 m de diamètre sont considérés comme des fours de laboratoire et sont à peine capables de traiter un seul embout de nez ou un insert de tuyère. Les dimensions de la production industrielle sont supérieures à 2 m de hauteur et 2 m de diamètre. Ces fours ont plusieurs orifices: au moins un grand orifice pour l'alimentation électrique, d'autres pour l'instrumentation et, lorsque les températures sont mesurées par des capteurs optiques ou pyromètres infrarouges, un ou plusieurs orifices de visualisation.

Les fours CVD sont à double paroi de sorte qu'ils peuvent être refroidis à l'eau pendant leur fonctionnement. Les câbles d'alimentation sont grands et peuvent également être refroidis à l'eau. La cornue proprement dite est logée à l'intérieur du four et est chauffée par un chauffage à induction ou à résistance en graphite à des températures comprises entre 2 200 °C et 2 900 °C.

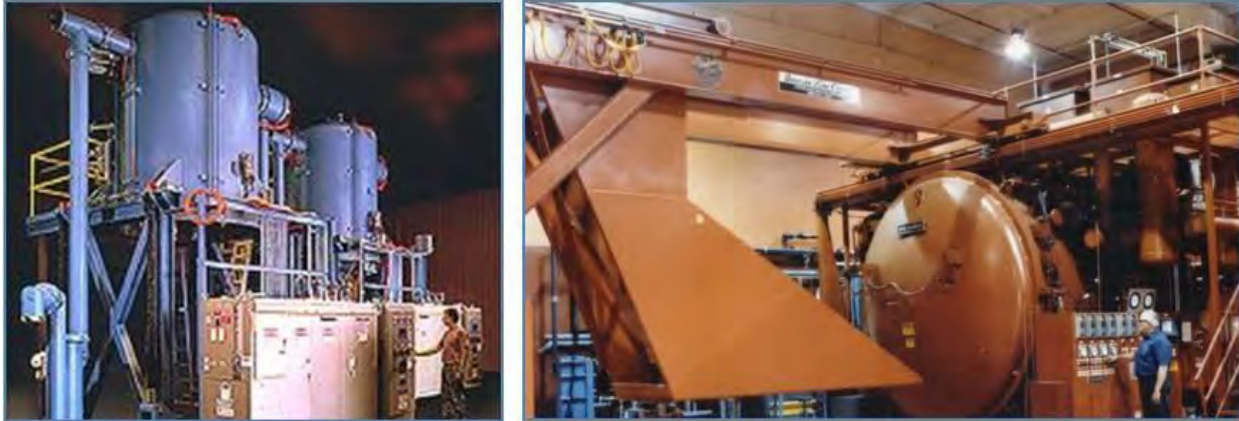


Schéma 67: *Gauche*: Un four de CVD à grande échelle fait sur commande qui chauffe inductivement le graphite aux températures dans les 2800 °C. (CVI) *Droite*: Un grand four de CVD. (Seco Warick)

Le schéma 67, montre un four CVD conçu sur mesure, composé de plusieurs composants, dont un récipient d'imprégnation pour ajouter une résine liquide à la préforme, des panneaux d'instrumentation et de contrôle (à l'avant-plan) et un four de carbonisation sous pression.

**Aspect (à l'emballage):** L'emballage se compose de palettes et de caisses pour chaque pièce en raison de la grande taille et du poids de l'équipement. Les grands couvercles, l'alimentation électrique et le corps du four sont souvent munis de points de levage ou d'anneaux intégrés pour faciliter leur déplacement et leur assemblage.

6.B.5. Dispositifs de commande de l'équipement et des procédés, autres que ceux visés par les articles 6.B.3. ou 6.B.4, conçus ou modifiés pour la densification et la pyrolyse des pièces composites des tuyères de fusées et des nez de corps de rentrée.

**Nature et But:** L'équipement spécialisé et les contrôles de procédé sont essentiels à la densification et à la pyrolyse nécessaires à la production des composites structuraux utilisés pour les tuyères de fusée et les nez de tuyères de RV. Un logiciel spécialement conçu est souvent nécessaire pour faire fonctionner l'équipement et/ou contrôler les processus de production de ces composites structuraux. La fabrication de pièces composites à partir de ce type de matériau requiert habituellement des cycles dans diverses conditions de procédé telles que des températures et/ou pressions élevées. Un contrôle précis des conditions au cours des cycles et de leur synchronisation est essentiel pour garantir des résultats acceptables. Cette rubrique nécessite également la documentation (données techniques) des différents paramètres de processus nécessaires à la production de ces matériaux.

**Mode de fonctionnement:** L'équipement, les contrôles de procédé et les logiciels de densification et de pyrolyse sont utilisés tout au long du processus de fabrication des composites structuraux pour manipuler, traiter et finir le matériau et les produits obtenus (c.-à-d. les tuyères de fusée et les nez de pointe avant des RV).



**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cet équipement et ces contrôles de procédé, ainsi que les logiciels associés, sont utilisés pour produire des composites structuraux (y compris des éléments carbone-carbone) utilisés pour les tuyères de fusées et les embouts avant des RV.

**Autres usages:** Ces articles sont également utilisés pour le collage par diffusion des métaux, en métallurgie des poudres et pour traiter les composants en métal.

**Aspect (sortie d'usine):** L'équipement ressemble aux autres équipements industriels mais peut inclure de plus petits articles (d'une taille pour la recherche). Les contrôles du processus peuvent prendre la forme de données techniques comme le papier, la bande magnétique, ou d'autres médias.

**Aspect (à l'emballage):** Les pièces d'équipement plus grandes peuvent être expédiées sous forme de composants, tandis que les pièces plus petites peuvent être expédiées assemblées. Ces articles sont généralement expédiés dans des caisses ou sur des palettes de la même manière que les autres équipements industriels. Les contrôles de processus (y compris les données techniques) sont expédiés comme toute autre information sur papier, support magnétique ou autre support. Le logiciel et les données techniques peuvent être inclus dans les conteneurs d'expédition avec leur équipement respectif.

## 6.C. Matériaux

Fibres préimprégnées de résine et préformés fibreux à revêtement métallique pour les produits mentionnés à l'article 6.A.1, faits avec une matrice organique ou métallique utilisant des renforts fibreux ou filamenteux possédant une résistance à la traction spécifique supérieure à  $7,62 \times 10^4$  m et un module spécifique supérieur à  $3,18 \times 10^6$  m.

**Note:**

L'article 6.C.1. ne mentionne que les fibres préimprégnées de résine utilisant une résine dont la température de transition vitreuse ( $T_g$ ), déterminée selon la norme ASTM D4065 ou selon une norme nationale équivalente, est supérieure à 145 °C après polymérisation.

**Notes techniques:**

1. Dans l'article 6.C.1., la «résistance spécifique à la traction» est la résistance maximale à la traction exprimée en  $N/m^2$ , divisée par le poids spécifique exprimé en  $N/m^3$ , mesurée à une température de  $(296 \pm 2)K$  ( $(23 \pm 2)^\circ C$ ) et à une humidité relative de  $(50 \pm 5)\%$ .
2. Dans l'article 6.C.1., "le «module spécifique» est le module de Young exprimé en  $N/m^2$ , divisé par le poids spécifique exprimé en  $N/m^3$ , mesuré à une température de  $(296 \pm 2)K$  ( $(23 \pm 2)^\circ C$ ) et à une humidité relative de  $(50 \pm 5)\%$ .

- France
- Allemagne
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

Production  
globale



**Nature et But:** Les préimprégnés et les préformes sont les matériaux de base à partir desquels sont fabriquées des structures composites légères et très résistantes. Prepreg est le nom donné à un matériau semblable à un tissu fait de fibres et imprégné de résines. Les préimprégnés sont assemblés sur une forme (par exemple, un mandrin ou un moule) pour obtenir la forme souhaitée. Parfois, plusieurs couches sont utilisées pour créer des stratifiés. Les préformes sont des structures solides, tridimensionnelles, en fibres, ayant la même forme et à peu près les mêmes dimensions que la pièce souhaitée et imprégnées de résine. Après durcissement, la préforme est usinée dans sa configuration finale.

Habituellement, les matériaux visés sont ensuite durcis à des températures supérieures à 175 °C pour terminer la polymérisation

de la résine thermodurcissable et pour atteindre une température de transition vitreuse élevée.

**Mode de fonctionnement:** Les préimprégnés et les préformés sont des précurseurs des composés et des stratifiés qui peuvent être employés presque n'importe où dans les missiles balistiques et les véhicules aériens sans pilote, y compris des missiles de croisière. Les utilisations comprennent les boîtiers de moteurs fusée à propergol solide, les interétages, les ailes, les entrées d'air, les tuyères, les boucliers thermiques, les pointes avant, les éléments structurels, les cadres.



**Schéma 68:** *Gauche:* Une ogive pour un lanceur spatial fabriquée en employant des techniques de préimprégné avancées. (ATK) *Droite:* Matériau de préimprégné employé dans la fabrication de structures aérospatiales et de structures de défense composites de poids léger. (Ibid)

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces matériaux sont utilisés pour produire des composites structuraux (y compris des articles carbone-carbone) utilisés dans une gamme d'applications aérospatiales et de défense, y compris les tuyères de fusées, les missiles, les structures de satellites et les pointes avant pour les RV.

**Autres usages:** Les préimprégnés et les préformes permettent aux structures composites d'être formées dans presque toutes les formes pour répondre aux exigences. Ils sont utilisés dans les avions civils et militaires, les produits récréatifs (tels que les équipements pour les sports nautiques, les skis et les clubs de golf), les infrastructures et l'industrie. Ils se prêtent également à des applications médicales dans la conception de prothèses et d'instruments chirurgicaux.

**Aspect (sortie d'usine):** Les préimprégnés sont des produits textiles qui sont imprégnés de résine flexible. Ils sont fabriqués en filaments minces, en bandes de moins d'un millimètre à quelques centimètres de large et en tissus de quelques mètres de larges. Ils sont généralement stockés sur des bobines ou des rouleaux, comme du fil ou du tissu (voir Figure 68- droite), et ressemblent à du fil non- imprégné.

Bien qu'un préimprégné puisse encore se déformer, il est beaucoup moins susceptible de draper qu'un tissu, un ruban ou un fil sans résine; cependant, ils sont tous suffisamment déformables pour être façonnés en une pièce structurelle composite. Les préimprégnés peuvent être utilisés pour modeler la forme approximative d'une pièce souhaitée, appelée préforme. Un cône de nez fabriqué à l'aide d'une technique avancée de stratification manuelle préimprégnée est illustré à la figure 9 - à gauche. Après chauffage et durcissement, ces préformes sont usinées jusqu'à leur forme et leur finition finales.

**Aspect (à l'emballage):** Le préimprégné est expédié dans plusieurs sacs en plastique avec des feuilles de raidisseur des deux côtés du matériau pour éviter qu'il ne se plie, ne se torde ou ne se froisse. Le sac extérieur agit comme une barrière vapeur/humidité et contient un dessiccant pour maintenir une humidité relative de 50% ou moins. Les matériaux fibreux doivent être réfrigérés après imprégnation avec de la résine. La réfrigération empêche la résine de se polymériser et de durcir avant que le préimprégné ne soit utilisé pour fabriquer des matériaux composites. Si la température est maintenue à environ -20 °C, la durée de conservation du préimprégné est d'environ six mois. Pour maintenir des températures suffisamment basses pendant le transport, le matériau préimprégné est emballé dans des conteneurs spéciaux pour le refroidissement de la glace carbonique (Figure 69), ou il est expédié dans des conteneurs réfrigérés mécaniquement.

- 6.C.2. Composants pyrolysés resaturés (c'est-à-dire carbone-carbone) ayant toutes les caractéristiques suivantes:
- Conçus pour les systèmes de fusée; et
  - Utilisables dans les systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A.1.

- Brésil
- France
- Inde
- Japon
- Ukraine
- États-Unis
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Fédération de Russie
- Royaume Uni

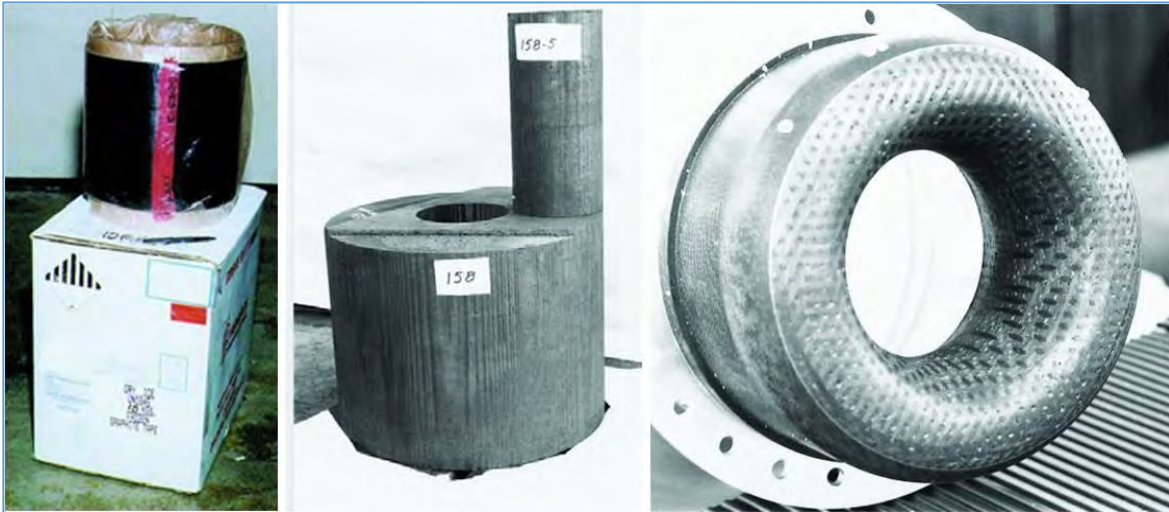
Production globale



**Nature et But:** Le carbone-carbone est un composé de fibre de carbone, généralement fait à partir du pas, du rayon, ou du polyacrylonitrile (PAN), dans une matrice à dominance carbone. Il est généralement fait en employant une résine à haute teneur en carbone comme matrice initiale et puis en éliminant les éléments non-carbones par une chaleur élevée. Il est léger, fortement thermorésistant, résistant aux chocs thermiques et malléable pour la prise de forme.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les matériaux en carbone-carbone sont employés pour les articles tels que les cônes et les tuyères de sortie de moteur de fusée et les pointes avant de corps de rentrée (RV), les boucliers thermiques et les bords d'attaque des gouvernes qui doivent résister aux effets des températures et de l'ablation.

**Autres usages:** Les structures carbone-carbone sont utilisées dans les applications aéronautiques militaires et civiles, telles que les sabots de frein haute température, et dans d'autres applications nécessitant une grande résistance et un poids réduit, comme les emplantures des ailes. Elles peuvent également être utilisées pour des outillages nécessitant une longue durée de vie dans des environnements de fabrication sévères, généralement à haute température, tels que les poches de coulée pour l'acier, les réchauffeurs pour les fours à très haute température, et les outils de presse à chaud.



*Schéma 69 à Gauche:* Container spécial en carton pour l'emballage de glace sèche autour d'une bobine de bande de préimprégné pendant l'expédition. La glace sèche est normalement contenue dans un sachet en plastique autour de la bobine. (Un manuel pour le groupe de fournisseur nucléaire à double utilisation, rapport numéro LA-13131-M (avril 1996) milieu: Un bloc de matériau carbone-carbone prêt à être usiné en tuyère de fusée. Le plus grand bloc cylindrique a un diamètre d'environ 70 cm. (Ibid) droite: Une gorge de tuyère de fusés en carbone-carbone montrant le modèle de tissu des fibres fondamentales. (Ibid)





- Brésil
- Chine
- Inde
- Fédération de Russie
- États-Unis

Production globale



Le graphite à grain fin se distingue par l'absence de piqûres en surface et certains des détails fins qui sont souvent présents dans le produit fabriqué. Le graphite est beaucoup plus souple que les métaux; un stylo à bille peut bosseler la surface.

**Aspect (à l'emballage):** Ces matériaux sont emballés pour protéger leurs surfaces délicates et souvent pour prévenir toute contamination de surface. Généralement, les pièces sont placées dans des sacs ou des contenants en plastique, qui sont emballés dans des matériaux normalement utilisés pour les pièces fragiles (p. ex., papier bulle, mousse, etc.).

6.C.4. Graphites pyrolytiques ou fibreux renforcés utilisables dans les tuyères de fusées et des nez de corps de rentrée, pouvant servir avec les systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A.1;

- Chine
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Le graphite pyrolytique est une forme de graphite unique. Il est fabriqué par décomposition d'hydrocarbures gazeux, généralement du méthane, dans un four sous vide à haute température. Le résultat est un produit d'une pureté exceptionnelle qui se rapproche de la densité théorique et qui est très anisotrope en raison de sa structure en couches. A travers les couches (plan C), il a une très faible conductivité thermique et agit comme isolant. Le long des couches (plan A-B), il a une conductivité thermique très élevée et agit comme un excellent conducteur. Ses propriétés thermiques, électriques et mécaniques sont généralement de loin supérieures à

celles du graphite conventionnel. Le graphite pyrolytique est chimiquement inerte, stable à 3000 °C, imperméable, auto-lubrifiant, non poussiéreux et de faible poids. Cependant, sa conductivité thermique inégale et tendance aux fissures qui en résulte limite certaines applications.

**Mode de fonctionnement:** Pour fabriquer le graphite pyrolytique, le matériau superficiel fondamental sur lequel le graphite pyrolytique est déposé est chauffé à une température relativement élevée, entre 1500 et 2500 °C. Le gaz d'hydrocarbure est introduit sous haute température et pression réduite. Le résultat est que le graphite pyrolytique forme un ablatif (capable d'être brûlé d'une manière contrôlée) et une couche d'isolation pouvant résister à la chaleur d'un moteur de fusée.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le graphite pyrolytique a une variété d'applications aérospatiales et de défense en raison de sa capacité à résister à des températures extrêmement élevées et aux chocs thermiques. En particulier, il est utilisé dans la conception et la fabrication de tuyères de fusées, sur les pointes avant des RV et dans les boucliers thermiques.

**Autres usages:** Les propriétés de conduction exceptionnelles du graphite pyrolytique offrent des solutions utiles pour la dissipation de la chaleur dans l'électronique de puissance à semi-conducteurs à flux thermique élevé, comme les circuits RF et sans fil, les diodes électroluminescentes (DEL), les diodes laser, les semi-conducteurs à large espacement et les couvercles de circuit intégré. Le graphite pyrolytique est également utilisé dans la fabrication de matrices et d'outils de formage qui façonnent le verre semi-fondu ainsi que les éléments chauffants, les cibles de pulvérisation et les isolateurs thermiques. Le graphite pyrolytique est également utilisé par les fabricants de verre spécialisé, ainsi que dans les contenants en verre et les verres à pied.



**Aspect (sortie d'usine):** La densité du graphite traité varie de 1,64 g/cm<sup>3</sup> à 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Sous forme de poudre, il est de couleur gris foncé à noir. Dans les pièces fabriquées, la couleur est noire avec un degré de brillance qui dépend du processus d'usinage. Les surfaces sont piquées.

**Aspect (à l'emballage):** Le danger de fissuration auquel le graphite pyrolytique est sensible exige qu'il soit bien emballé, les composants étant généralement placés dans des sacs ou des contenants en plastique, entourés de film à bulles ou de mousse.



Schéma 71: Une sélection de plaques et de tiges de graphite pyrolytiques qui sont de haute densité, solidité et pureté. Notez la surface piquée de la grande plaque du côté gauche de cette figure. (Advanced Carbon Technologies, Inc)

6.C.5. Matériaux composites céramiques (constante diélectrique inférieure à 6 à des fréquences comprises entre 100 Hz et 100 GHz) utilisables dans les radômes de missiles des systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A.1;

- Chine
- Allemagne
- Japon
- États-Unis
- France
- Inde
- Fédération de Russie

Production globale



**Nature et But:** Les matériaux composites céramiques ont une résistance et des propriétés thermiques suffisantes pour une certaine utilisation comme matériaux boucliers thermiques. Contrairement aux matériaux à base de carbone, cependant, les céramiques sont des isolants et ne conduisent pas l'électricité tandis que les rayonnements électromagnétiques (par exemple, les ondes radar ou radio) peuvent les traverser. Ils sont utiles pour protéger les structures et les équipements contre le réchauffement aérodynamique tout en permettant la transmission ou la réception de signaux.

Les composites céramiques renforcés au carbure de silicium conviennent pour une utilisation jusqu'à 1200 °C dans une atmosphère oxydante et à une température légèrement plus élevée s'ils sont enduits. Les composites en carbure de silicium renforcés par des filaments ont une grande résistance à la rupture et sont considérablement plus légers que les superalliages. Ces caractéristiques les rendent utilisables pour les radômes de missiles.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Des matériaux composites céramiques ont été utilisés dans les fenêtres d'antennes de missiles balistiques de RV. Les pointes avant en carbure de silicium non cuites sont dures et très résistantes à la chaleur; cependant, comme elles ont tendance à s'écailler mais ne se cassent pas, elles ne sont pas largement utilisées.

**Autres usages:** Des céramiques très résistantes à la chaleur sont utilisées dans certains moteurs à turbine à gaz, moteurs d'automobiles, fours et récepteurs d'énergie solaire. Leurs utilisations comprennent les tiges et les billes de meulage, les tuiles de four, les tasses et les tuyères de soudage, les tuyères de sablage et diverses pièces complexes pour les applications électroniques. Il s'agit d'un matériau d'outillage courant utilisé dans les étapes de fabrication à des températures élevées. Les composites céramiques renforcés au carbure de silicium sont utilisés dans certains réacteurs militaires pour les volets de contrôle du vecteur poussée.

**Aspect (sortie d'usine)** Les matériaux composites céramiques utilisés dans les fenêtres d'antennes de RV utilisent généralement un renfort en filaments céramiques pour prévenir les défaillances induites par la contrainte thermique. Un bloc de silice et de silice tridimensionnelle (3D) à partir duquel sont fabriquées les fenêtres d'antenne peut avoir un motif textile apparent sur toutes ses surfaces. Ce matériau est souvent recouvert d'une couche protectrice transparente comme barrière contre l'humidité. Une céramique renforcée au carbure de silicium a le même motif mais présente une couleur gris foncé ou noire.

Tous ces matériaux céramiques sont très durs, beaucoup plus durs que les autres composites, et ont une surface structurée comme le renfort textile. Ils sont disponibles dans pratiquement toutes les tailles entre des disques de 1 mm et des cubes de 50 cm, qui peuvent être coupés et rectifiés selon la configuration requise par un outil diamanté.

**Aspect (à l'emballage):** En raison de leur coût élevé et de leur fragilité, ces composites sont emballés dans des matériaux absorbant les chocs. Comme le matériau silice-silice est également hygroscopique (c.-à-d. qu'il absorbe l'eau), il est aussi conditionné dans des sacs scellés en Mylar ou en plastique, souvent avec un dessiccant dans le grand contenant d'emballage. Certains expéditeurs remplissent en outre les sacs scellés avec de l'azote sec pour protéger le matériau de l'absorption d'eau.

- 6.C.6. Matériaux en céramique à température élevée, comme suit:
- Blocs bruts usinables de céramiques non cuites renforcées au carbure de silicium utilisables dans les nez de pointes avant des systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A.1;
  - Composites céramiques renforcés de carbures de silicium non oxydés, usinables, utilisables dans les nez de pointes avant, les corps de rentrée, les volets de tuyère, dans les systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A.1.
  - Matériaux composites céramiques usinables en vrac, constitués d'une matrice en "céramique ultra-haute température (UHTC)" ayant un point de fusion égal ou supérieur à 3 000 °C et renforcée par des fibres ou des filaments, utilisables pour des composants de missiles (tels que pointes avant, véhicules de rentrée, bords avant, aubes de jet, gouvernes ou plaquettes de moteur fusée) dans les systèmes visés aux points 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2.

Note:

Article 6.C.6.c. ne vise pas les matériaux en céramique à ultra-haute température (UHTC) sous forme non composite.

Note technique:

Les «céramiques à ultra-haute température (UHTC)» comprennent:

- Diborure de titane (TiB<sub>2</sub>);
- Diborure de zirconium (ZrB<sub>2</sub>);
- Diborure de niobium (NbB<sub>2</sub>);
- Diborure d'hafnium (HfB<sub>2</sub>);
- Diborure de tantale (TaB<sub>2</sub>);
- Carbure de titane (TiC);
- Carbure de zirconium (ZrC); 8 Carbure de niobium (NbC);
- Carbure de hafnium (HfC);
- Carbure de tantale (TaC)

- |                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| •Autriche             | •Brésil              |
| •Chine                | •France              |
| •Allemagne            | •Inde                |
| •Italie               | •Japon               |
| •Fédération de Russie | •République de Corée |
| •Suisse               | •Royaume Uni         |
| •États-Unis           |                      |

## Production globale



**Nature et But:** Le carbure de silicium est un composé de silicium et de carbone utilisé dans la fabrication de matériaux céramiques solides. On le trouve également dans la rare moissanite minérale. Lorsque la poudre de carbure de silicium est chauffée au-dessous de son point de fusion dans un procédé appelé " frittage ", les particules adhèrent les unes aux autres pour former des céramiques extrêmement dures ayant des propriétés d'endurance élevées. Les composites céramiques renforcés au carbure de silicium peuvent résister à des températures allant jusqu'à 1 200 °C dans des conditions d'oxydation.

Les céramiques ultra-haute température (UHTC) sont une classe de matériaux qui peuvent être utilisés dans des environnements présentant des températures extrêmes,

une réactivité chimique (oxydation) et une attaque érosive. Les UHTC peuvent être définis comme ayant des points de fusion supérieurs à 3 000 degrés Celsius. Les matériaux composites UHTC utilisent des fibres ou des filaments de matériaux tels que le carbure de bore ou le carbure de silicium pour renforcer ces matériaux

céramiques.

**Mode de fonctionnement:** Les propriétés critiques du carbure de silicium possèdent une faible densité, une haute résistance, une faible dilatation thermique, une conductivité thermique élevée, une dureté élevée, une excellente résistance aux chocs thermiques et une inertie chimique supérieure.

Les points de fusion plus élevés de l'UHTC et l'utilisation de renforts de fibres (composites) peuvent atténuer certains des inconvénients traditionnels associés à d'autres céramiques, y compris une tendance à la rupture sous des contraintes thermiques et une résistance à l'oxydation moindre. Parmi les plus prometteurs à ce jour, on trouve ceux qui utilisent des diborures et des carbures de métaux de transition précoces, dont le diborure de titane (TiB<sub>2</sub>), le carbure de hafnium (HfC) et le carbure de tantale (TaC).



Schéma 72: Les enduits de carbure de silicium ont une vaste gamme d'applications spatiales et aérospatiales, y compris la protection du matériel en graphite de l'oxydation. (Schunk Group)

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le carbure de silicium est utilisé dans les tuyères des moteurs fusée, les pointes avant et les volets des tuyères. Il est également utilisé dans les fenêtres d'antennes de RV de missiles balistiques. Sa capacité à résister à de forts chocs thermiques lui permet d'être utilisé comme bouclier thermique et sa non-conductivité de l'électricité et des rayonnements électromagnétiques protège les engins spatiaux de la chaleur tout en permettant une communication continue avec le poste de contrôle au sol. Un revêtement en carbure de silicium protège contre l'oxydation les panneaux carbone-carbone renforcés le long des bords d'attaque et des ogives de RV. Les composites contenant du carbure de silicium et renforcés de filaments sont très

robustes résistantes à la chaleur et plus légères que les superalliages; ces caractéristiques sont extrêmement importantes dans les pointes avant conçues pour la rentrée dans l'atmosphère terrestre.

Les composites UHTC peuvent être utilisés comme pointes avant de véhicules de rentrée, d'inserts de moteur-fusée à propergol solide, d'aubes de jet et de surfaces de contrôle. Une caractéristique intéressante des composites UHTC réside dans leur faible densité (et donc leur poids) par rapport aux métaux réfractaires qu'ils pourraient remplacer, comme le tungstène et le rhénium, ce qui permet une meilleure portée et une meilleure performance des charges utiles du système missile.



Schéma 73: Un strake UHTC composé de trois sections différentes avec des compositions UHTC différentes

**Autres usages:** Les qualités abrasives du carbure de silicium, son faible coût et sa durabilité sont utiles dans le travail lapidaire ainsi que dans les fonctions d'usinage abrasif telles que le sablage, le rodage, la découpe au jet d'eau et la rectification. Le carbure de silicium est utilisé dans les armures composites ainsi que dans le revêtement céramique des gilets pare-balles. Un gilet pare-balles récemment mis au point, fabriqué à partir de petites plaques de céramique en carbure de silicium qui se chevauchent, offre à l'utilisateur une flexibilité accrue et résiste aux balles tirées à partir d'un AK-47.

Les composites céramiques renforcés au carbure de silicium sont utilisés comme volets de contrôle du vecteur poussée dans certains réacteurs militaires. Le carbure de silicium est un composant important des diodes électroluminescentes (DEL). Son faible coefficient de dilatation thermique, sa dureté élevée et ses propriétés de conductivité thermique sont utilisés dans la fabrication de miroirs pour télescopes astronomiques. Le composé est également utilisé dans certains véhicules automobiles ainsi que dans les moteurs à turbine à gaz, les fours et les panneaux solaires passifs. On le trouve dans les tuiles de fours, les tasses à souder et dans les applications industrielles qui fonctionnent à haute température.

Les céramiques à ultra-haute température qui utilisent des diborures d'hafnium et de zirconium présentent un intérêt particulier pour l'industrie aérospatiale pour des applications à la pointe de la technologie qui exigent une stabilité chimique et structurelle à des températures de fonctionnement extrêmement élevées. Le vol hypersonique prolongé est limité par les matériaux en raison du flux de chaleur élevé sur de petites surfaces, de la température élevée, de l'oxydation, de l'érosion et des pics de température très élevés dans le matériau. L'utilisation des UHTCs pour conduire l'énergie à travers le matériau et la faire rayonner à travers des surfaces plus froides est une méthode alternative pour gérer la chaleur des surfaces de contrôle hypersoniques.

**Aspect (sortie d'usine)** Les matériaux composites céramiques produits comme composants de fusées, par exemple les fenêtres d'antennes de RV, sont renforcés avec un filament céramique pour éviter les défaillances dues à des contraintes thermiques. La silice et la silice tridimensionnelles utilisées pour fabriquer les fenêtres d'antenne peuvent avoir un motif textile sur toutes les surfaces. Pour éviter l'humidité, ce matériau est souvent protégé par un revêtement transparent. Les céramiques renforcées de carbure de silicium présenteront le même motif de surface mais la couleur est noire ou gris foncé. Ces substances céramiques sont beaucoup plus dures que les autres composites et possèdent un motif de surface qui reflète leur renfort textile. La taille des disques varie de 1 mm à 50 cm de cubes qui peuvent ensuite être coupés ou usinés à la forme désirée.

**Aspect (à l'emballage):** Le carbure de silicium est un composé fragile et des matériaux absorbant les chocs sont donc utilisés pour emballer les composites de carbure de silicium. Des sacs scellés ou d'autres plastiques sont utilisés pour prévenir l'exposition à l'humidité pendant le transport. Les envois plus volumineux contiennent souvent des dessiccants. Les sacs scellés sont parfois remplis d'azote sec pour fournir une protection supplémentaire contre l'absorption d'eau.

6.C.7. Matériaux pour la fabrication de composants de missiles dans les systèmes visés aux articles 1.A. 19.A.1. 19.A.1. ou 19.A.2, comme suit:

- a. Tungstène et alliages sous forme de particules ayant une teneur en tungstène d'au moins 97 % en poids et une taille de particule de  $50 \times 10^{-6}$  (50  $\mu\text{m}$ ) ou moins;
- b. Tungstène et alliages sous forme de particules ayant une teneur en tungstène d'au moins 97 % en poids et une taille de particule de  $50 \times 10^{-6}$  m (50  $\mu\text{m}$ ) ou moins;
- c. Matériaux en tungstène sous forme solide ayant tous les éléments suivants:
  1. Une des compositions ci-après:
    - i. Tungstène et alliages contenant 97 % ou plus en poids de tungstène;
    - ii. Tungstène infiltré avec du cuivre contenant au moins 80 % en poids de tungstène;
    - iii. Tungstène infiltré avec de l'argent contenant au moins 80 % en poids de tungstène;
  2. Pouvant être intégrés par usinage à l'un des produits suivants:
    - i. Cylindres d'un diamètre supérieur ou égal à 120 mm et d'une longueur supérieure ou égale à 50 mm;
    - ii. Tubes d'un diamètre intérieur supérieur ou égal à 65 mm, ayant une paroi d'une épaisseur d'au moins 25 mm et mesurant au moins 50 mm de long; ou
    - iii. Blocs dont les dimensions sont d'au moins 120 mm x 120 mm x 50 mm.

- Allemagne
- Japon
- Fédération de Russie
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Le tungstène et le molybdène sont des éléments qui appartiennent à une classe de métaux réfractaires. Les propriétés communes de ces métaux réfractaires incluent des points de fusion supérieurs à 2000 °C, une densité relativement élevée, une inertie chimique et une résistance à la déformation par fluage dans des environnements à température élevée. En raison du point de fusion élevé de ces matériaux, la métallurgie des poudres est la méthode de fabrication préférée.

Le tungstène et les alliages contenant du tungstène sous forme de poudre offrent des propriétés uniques pour la production de composants de missiles. Le très haut point de fusion du tungstène (3.422 °C), sa capacité à contrôler la porosité de la pièce et sa résistance à l'auto-diffusion le rendent idéal pour les zones de la tuyère de la fusée qui doivent fonctionner dans des conditions extrêmes telles que les inserts de gorge. Le molybdène et les alliages contenant du molybdène en poudre sont souvent utilisés là où l'environnement le permet (son point de fusion est de 2 623 °C) car ils sont moins chers et plus légers que le tungstène.

Le tungstène sous forme solide peut être infiltré avec du cuivre ou de l'argent. Le matériau composite qui en résulte est plus léger que le tungstène pur, plus facile à usiner et résiste aux chocs thermiques grâce à la conductivité thermique accrue fournie par le matériau infiltré.



**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les alliages de tungstène et de molybdène sont utilisés dans les systèmes de missiles pour les aubes de contrôle vectoriel, les inserts de tuyère et de gorge, les boucliers déflecteurs de panache et les pointes avant des RV.

**Autres usages:** La poudre de tungstène est employée dans le travail d'évaporation du métal, les joints de verre-à-métal, les contacts électriques et comme élément d'alliage pour l'acier. Les pointes d'outil en tungstène-carbure sont critiques pour le travail du métal, l'industrie minière et l'industrie pétrolière. Le tungstène infusé de cuivre est également employé pour les électrodes de soudure de projection et quelques applications pour les électrodes d'usinage de décharge électrique (EDM) exigeant un détail plus pointu et une meilleure finition extérieure. Le molybdène est un élément utilisé pour la métallurgie des poudres. D'autres applications incluent les éléments chauffants pour les fours et comme additif pour les lubrifiants à haute température.

**Aspect (sortie d'usine)** Le tungstène, le molybdène et leurs alliages sous forme de particules sphériques ou atomisées ressemblent à de nombreux autres produits métallurgiques en poudre. Les particules ont un éclat métallique et coulent librement grâce à leur forme sphérique. Le tungstène sous forme solide est un métal lustré blanc argenté qui ternit à l'air en formant une couche protectrice d'oxyde.

**Aspect (à l'emballage):** Ces matériaux, sous forme de particules, sont conditionnés dans des contenants ou des fûts scellés afin de minimiser le contact avec l'air et l'oxydation de la surface des particules. Les conteneurs sont lourds en raison de leur taille et sont fixés à une palette ou à un conteneur pour empêcher tout mouvement.

6.C.8 Aciers maraging, utilisables dans les systèmes visés aux alinéas 1.A. ou 19.A.1. et présentant toutes les caractéristiques suivantes:

- a. ayant une résistance maximale à la traction, mesurée à 20 °C, égale ou supérieure à:
  1. 0,9 GPa à l'état recuit en solution; ou
  2. 1,5 GPa à l'étape de durcissement par précipitation; et
- b. Se présentant sous l'une des formes suivantes:
  1. Feuille, plaque ou tube dont la paroi ou l'épaisseur de la plaque est égale ou inférieure à 5,0 mm; ou
  2. Formes tubulaires dont l'épaisseur de paroi est égale ou inférieure à 50 mm et dont le diamètre intérieur est égal ou supérieur à 270 mm.

**Notes techniques:**

*Les aciers maraging sont des alliages de fer:*

- a. *généralement caractérisés par une teneur élevée en nickel, une très faible teneur en carbone et l'utilisation d'éléments de substitution ou de précipitation en vue d'obtenir un durcissement et une meilleure tenue au vieillissement de l'alliage*
- b. *Soumis à des cycles de traitement thermique pour faciliter le processus de transformation martensitique (étape de recuit en solution) et ensuite durci par vieillissement (étape de durcissement par précipitation).*

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| •Autriche       | •Chine                |
| •France         | •Géorgie              |
| •Allemagne      | •Inde                 |
| •Iran           | •Israël               |
| •Japon          | •Fédération de Russie |
| •Afrique du Sud | •République de Corée  |
| •Suède          | •Suisse               |
| •Royaume Uni    | •États-Unis           |

Production  
globale



**Nature et But:** L'acier maraging se distingue par sa haute résistance à la torsion et sa bonne ténacité à la rupture, tout en conservant ses propriétés d'usinabilité, de malléabilité et de soudabilité. Les aciers maraging se distinguent des aciers conventionnels en ce sens qu'ils utilisent la précipitation de composés intermétalliques et non de carbone pour obtenir une résistance souhaitée. Les formules types d'acier maraging ont une teneur relativement élevée en nickel (18 % ou plus). Les composés intermétalliques proviennent de l'ajout de cobalt, de molybdène et de titane. La teneur en carbone (moins de 0,03 %) est maintenue pour toutes les nuances d'acier maraging.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les formes contrôlées par le MTCR (feuilles, plaques

et tubes) sont généralement employées pour fabriquer des enveloppes de moteur-fusée à propergol solide, des réservoirs propergol et des composants d'interétages.

**Autres usages:** Ces aciers sont utilisés pour les pièces d'avions spéciales, les coques de sous-marins, les lames de crampon, les tuyaux et les réacteurs des industries chimiques et nucléaires.

**Aspect (sortie d'usine)** L'acier maraging a une couleur gris brillant lorsqu'il est propre et nouvellement préparé. Si le métal a été soumis à un traitement de vieillissement pour améliorer la solidité, il peut avoir une couche foncée d'oxyde à la surface. Cette couche foncée peut également indiquer que l'acier maraging a été soumis à un degré

d'oxydation contrôlé afin d'améliorer sa résistance à la corrosion pendant le service.

**Aspect (à l'emballage):** L'acier maraging est souvent expédié dans un état à faible résistance et non traité thermiquement afin qu'il puisse être façonné dans la forme souhaitée par l'utilisateur final. Il est emballé et expédié comme de l'acier inoxydable, auquel il ressemble beaucoup. Les feuilles et les plaques sont empilées et fixées sur une palette. Les tubes sont également groupés et fixés à une palette. Les deux peuvent être recouverts d'une feuille de plastique et/ou mis en caisse pour protéger les matériaux de l'environnement d'expédition.

6.C.9. Acier inoxydable duplex stabilisé au titane (Ti-DSS), utilisable dans les systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A.1. et présentant toutes les caractéristiques suivantes:

a. Ayant toutes les caractéristiques suivantes:

1. Une teneur en chrome de 17 à 23 % en poids et une teneur en nickel de 4,5 à 7 % en poids;
2. Une teneur en titane supérieure à 0,1 % en poids; et
3. Une microstructure ferro-austénitique (appelée aussi microstructure biphasé) dont au moins 10 % en volume est constitué d'austénite (selon la norme ASTM E-1181-87 ou des normes nationales équivalentes); et

b. Se présentant sous l'une des formes suivantes:

1. Lingots ou lames d'une taille supérieure ou égale à 100 mm dans chaque dimension;
2. Feuilles d'une largeur de 600 mm ou plus et d'une épaisseur de 3 mm ou moins; ou
3. Tubes d'un diamètre extérieur supérieur ou égal à 600 mm et comportant une paroi d'une épaisseur inférieure ou égale à 3 mm.

- Japon
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Royaume Uni
- États-Unis

Production  
Globale



**Nature et But:** L'acier inoxydable duplex stabilisé au titane (Ti-DSS) est un alliage spécial d'acier inoxydable reconnu pour sa facilité de soudage et sa résistance aux comburants à propergol liquide corrosif. Les formulations typiques pour le Ti-DSS vont de 17 % à 23 % en poids de chrome et de 4,5 % à 7,0 % en poids de nickel, et cet acier contient des traces de titane qui, par rapport aux autres aciers inoxydables, rendent le Ti-DSS particulièrement résistant aux comburants tels que l'acide nitrique à fumée rouge inhibiteur (ANFRI). De plus, le Ti-DSS est un matériau de préférence pour les applications de missiles à propergol liquide parce qu'il est facilement soudé à l'aide d'une technologie de soudage courante et, contrairement aux autres formes d'acier inoxydable, ne nécessite aucun traitement thermique après soudage.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les lingots ou les barres, les feuilles et les tubes conformes aux critères MTCR sont d'une taille suffisante pour être utilisés pour la fabrication des réservoirs de propergol liquide et de la tuyauterie de moteur de fusées.

**Autres usages:** Il y a très peu d'utilisations commerciales connues du Ti-DSS. Bien qu'utilisable pour de nombreuses applications en acier inoxydable, le Ti-DSS est très dur, ce qui le rend difficile à transformer en plaques ou en tubes. L'usinage ou la mise en forme de ce matériau est généralement trop coûteux pour les applications commerciales courantes. De plus, bien qu'il soit particulièrement résistant à l'ANFRI, un comburant de missiles courant, il ne fonctionne pas bien lorsqu'il est exposé à d'autres matières aussi corrosives, comme les engrais chimiques.

**Aspect (sortie d'usine)** Le Ti-DSS est pratiquement identique en apparence aux autres aciers inoxydables. Son grain est très fin, ce qui nécessite généralement une loupe ou un microscope pour le voir.

**Aspect (à l'emballage):** Le Ti-DSS est généralement emballé et expédié comme les autres aciers inoxydables. Les feuilles et les lingots ou les barres sont souvent empilés et fixés à une palette. Les tubes sont généralement groupés et fixés à une palette. Les deux peuvent être recouverts d'une feuille de plastique et/ou mis en caisse pour protéger les matériaux de l'environnement d'expédition.

## 6.D. Logiciel

### 6.D.1. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié aux fins de l'utilisation ou la maintenance du système mentionné

- France
- Inde
- Japon
- Fédération de Russie
- Suisse
- États-Unis
- Allemagne
- Italie
- Pays-Bas
- Suède
- Royaume Uni

Production globale



**Nature et But:** Les logiciels pour l'équipement de production de composites et de fibres sont utilisés dans les appareils CNC qui contrôlent le mouvement des enrouleurs de filaments, des machines de placement de fibres et de remorquage, et des machines de pose de rubans. La plupart de ces machines sont équipées d'un logiciel de simulation qui permet d'optimiser le mouvement de la machine hors ligne. D'autres logiciels de cette catégorie sont utilisés pour contrôler les machines à tisser et à tresser multidirectionnelles et multidimensionnelles utilisées pour la fabrication de structures composites complexes.

**Mode de fonctionnement:** Le logiciel est spécifiquement configuré pour fonctionner dans des CNC connectées à des machines de bobinage de filaments, des machines de placement de fibres et de

remorquage, et des machines de pose de bandes. Les machines à tisser et à entrelacer multidirectionnelles et multidimensionnelles ont des motifs programmés stockés dans des bases de données qui peuvent être modifiées pour des composants individuels.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Il peut être employé pour produire des enveloppes de moteur, des ailerons, des tuyères, des nez de pointe avant de corps de rentrée et d'autres pièces et composants.

**Autres usages:** Le logiciel peut être modifié pour produire des réservoirs de stockage de gaz naturel liquide, des réservoirs d'eau chaude, des réservoirs de gaz naturel comprimé, des axes de club de golf, des raquettes de tennis, des cannes à pêche, des pièces pour avions commerciaux et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique.

6.D.2. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié pour l'équipement spécifié dans les articles 6.B.3., 6.B.4., ou 6.B.5.

- Chine
- France
- Inde
- Japon
- Afrique du Sud
- Royaume Uni
- Danemark
- Allemagne
- Israël
- Fédération de Russie
- Suède
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Le logiciel utilisé dans l'ordinateur de contrôle de la presse isostatique commande la presse et surveille la pression et la température de l'eau de refroidissement. L'équipement de dépôt chimique en phase vapeur utilise un logiciel pour contrôler le processus de chauffage et d'alimentation en gaz de dépôt de la préforme en carbone poreux. Le logiciel de contrôle des processus est utilisé pour faire fonctionner les fours de pyrolyse à haute température et pour surveiller et contrôler les opérations utilisées pour produire des objets tels que les tuyères de fusée et les nez de tuyères pour RV.

**Mode de fonctionnement:** Le logiciel utilisé dans l'ordinateur de contrôle isostatique accepte l'entrée de l'opérateur spécifiant la pression et le temps.

Le logiciel active la presse et contrôle la pression de fonctionnement dans le temps. Il surveille la température de l'eau de refroidissement et la chaleur du four pour assurer que le système fonctionne dans la zone appropriée sans danger pour l'article. L'opérateur de processus de CVD utilise un ordinateur sur lequel le logiciel de régulation de processus approprié est installé pour régler la température du four, pour régler la pression et la synchronisation de gaz d'infusion et pour surveiller la température de l'eau de refroidissement et les autres sorties d'instrumentation et de capteur.

Le contrôle de température précis sur un temps relativement long est critique à la production des tuyères et des nez de pointe avant de fusée en carbone-carbone. Le logiciel de régulation de processus employé pour produire les matières composites structurelles contrôle la température et la pression du four de pyrolyse pendant un certain nombre de cycles déterminés par l'utilisateur.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le logiciel employé pour contrôler les processus de densification et de pyrolyse sont employés pour la fabrication des composants de missile fortement résistants à la température et

légers comme les tuyères de moteur de fusée et des nez de pointe avant de corps de rentrée.

**Autres usages:** Le logiciel de commande de presse isostatique est utilisé dans les procédés de collage par diffusion de matériaux similaires et dissemblables. Le logiciel de contrôle de procédé CVD est utilisé pour produire des optiques enduits, des outils de coupe, des instruments médicaux, et fabriquer des semi-conducteurs. Les logiciels qui contrôlent les procédés de densification et de pyrolyse sont également utilisés pour la liaison par diffusion des métaux et pour le traitement des composants métalliques.

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, un logiciel de contrôle de processus est un programme informatique stocké sur un support imprimé, optique, magnétique ou autre. Tous les médias communs comprenant la bande magnétique, les disquettes, les disques durs amovibles, les lecteurs flash USB, les disques compacts et les documents peuvent contenir ces logiciels et données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce «logiciel», y compris les copies électroniques de cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique.

## 6.E. Technologie

6.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de matières mentionnés aux articles 6.A, 6.B, 6.C ou 6.D.

6.E.2. «Données techniques» (y compris les conditions de traitement) et procédés pour la régulation de la température, de la pression ou de l'atmosphère dans les autoclaves ou hydroclaves utilisés pour la production des composites ou quasi composites, utilisables pour l'équipement ou les matières mentionnés par les articles 6.A. ou 6.C.

- L'autoclave ou l'équipement d'hydroclave est produit dans la plupart des pays industrialisés parce qu'il est utilisé dans les procédés de fabrication courants. Bien que la connaissance générale de ces processus soit largement répandue, les données sur les processus pour des applications spécifiques sont brevetées.

Production globale



**Nature et But:** La technologie de production des composants structuraux, du dépôt et de la densification pyrolytiques et des matériaux structuraux visés aux points 6.A, 6.B et 6.C est régie par l'annexe. Il s'agit notamment des connaissances nécessaires pour sélectionner correctement les matières premières (fibre, système époxy ou résine, durcisseurs) ainsi que les méthodes (instructions de procédé et d'assemblage) pour produire des composants pyrolysés composites et réimprégnés, et pour assurer le bon fonctionnement et l'entretien de l'équipement utilisé. La formation à l'utilisation des logiciels tels que définis au point 6.D de l'annexe et de la documentation associée serait également contrôlée.



Les données de contrôle des procédés sont utilisées pour gérer le traitement des composites ou des composites partiellement traités en composants utiles. Les données techniques d'intérêt concernant les autoclaves et les hydroclaves concernent généralement les paramètres et procédures de traitement, l'outillage et la préparation pour le durcissement et le contrôle du durcissement. Parce que les réglages précis de la température, de la pression et de la durée du procédé ont un effet critique sur la résistance, la résistance aux chocs et le module de flexion des pièces produites, les fabricants ont développé des procédés exclusifs. Ils publient rarement l'information pour la production de pièces spécifiques. Les conditions d'usinage, les périodes de débullage et les procédures associées sont généralement adaptées individuellement à la géométrie spécifique de la pièce et au système matériau/résine utilisé.

**Mode de fonctionnement:** Ces données sont utilisées comme référence pour la fabrication ou le traitement partiel de pièces composites spécifiques dans les autoclaves et les hydroclaves. Le contrôle de la polymérisation peut être effectué par un opérateur humain, mais il est plus souvent effectué par ordinateur en raison du temps requis pour le processus. Ce dernier peut être fondé sur le cycle de traitement prescrit par le fabricant de l'équipement ou sur une combinaison de modèles de traitement analytique, de capteurs à l'intérieur ou à proximité de la pièce à traiter et de connaissances sur le procédé intégrées au système.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces données font partie des instructions pour préparer le préformé ou le composite pour une utilisation en tant que composants fortement thermorésistants et ablatifs tels que les nez de pointe avant de corps de rentrée et les tuyères de moteur de fusée.

**Autres usages:** Les processus et les procédures semblables sont employés pour fabriquer des matériaux pour des applications commerciales de technologie composite, des coques de bateau aux clubs de golf.

**Aspect (sortie d'usine)** En général, les données techniques peuvent prendre la forme de modèles, de plans, de diagrammes, de formules, d'études, de caractéristiques, de manuels et d'instructions écrits ou enregistrés sur d'autres supports ou dispositifs tels que des disques, bandes, les lecteurs USB et mémoires mortes. Ces données sont généralement fournies dans les manuels et graphiques avec la documentation du fabricant de l'autoclave ou de l'hydroclave, ou avec les recommandations du fabricant de la résine. La documentation du fabricant fait référence à chacun des sous-composants et comprend les caractéristiques et les manuels d'instruction pour chacun d'eux. Ces composants incluent des éléments comme les contrôleurs ou les ordinateurs à semi-conducteur pour contrôler et surveiller la température et la pression pendant l'opération de polymérisation.

**Aspect (à l'emballage):** Les données accompagnant l'équipement et contenant les informations de polymérisation sont généralement placées dans des livres à feuilles mobiles ou dans un cahier d'instructions. Le format de la documentation est celui d'un rapport et accompagne le nouvel équipement. Les données fournies par les fabricants de résine ou du préimprégné sont sur des feuilles de données et accompagnent le matériel en résine brute ou préimprégné

6.E.3. «Technologie» relative à la fabrication de matériaux obtenus par pyrolyse mis en forme sur un moule, mandrin ou tout autre support à partir de précurseurs gazeux qui se décomposent entre 1 300 et 2 900 °C, et sous des pressions de 130 Pa (1 mm de Hg) à 20 kPa (150 mm de Hg), y compris la «technologie» pour la composition des gaz précurseurs, des schémas et paramètres de commande des débits et des processus.

**Nature et But:** Le dépôt pyrolytique est un processus à haute température employé pour déposer un enduit dense de métal, de céramique, ou de carbone sur un substrat (moule ou mandrin) afin de former une pièce. Il peut également être utilisé pour enduire un autre matériau afin d'obtenir une forte adhérence et adhérence entre le matériau de revêtement et la surface sous-jacente. Le but de ces processus est d'améliorer les capacités des éléments enduits ou densifiés pour qu'ils puissent supporter les environnements extrêmes dans lesquels opèrent les pièces critiques de système de fusée.

Les procédures générales et les méthodes employées pour créer des matériaux dérivés par pyrolyse et leurs gaz précurseurs sont largement connues. Toutefois, les formules, processus et réglages particuliers de l'équipement sont empiriquement dérivés et ils sont considérés comme étant des secrets commerciaux par l'industrie. Les données contrôlées (la technologie) peuvent prendre la forme d'une assistance technique comprenant l'instruction, l'expertise, la formation, les connaissances pratiques, l'aide à l'approvisionnement et les services de consultants. Les données techniques peuvent prendre la forme de modèles, de plans, de diagrammes, de formules, d'études, de caractéristiques, de manuels et d'instructions écrits ou enregistrés sur d'autres supports ou dispositifs tels que des disques, bandes, les lecteurs USB, CD-ROM et DVD.

**Mode de fonctionnement:** La technologie de dépôt pyrolytique du carbone se trouve principalement dans de petits laboratoires. La production industrielle à grande échelle par dépôt pyrolytique de carbone n'est pas une activité connue. La technologie n'est pas facilement partagée ni exportée. La technologie de dépôt de métal ou de céramique est plus répandue et peut être acquise par un pays de plusieurs façons. Un pays peut se doter de cette technologie grâce à l'enseignement dispensé par une personne expérimentée dans l'une ou plusieurs de ces matières contrôlées qui fait office de formateur dans une classe sur le site de production ou à proximité de ce dernier. Un pays peut recevoir une assistance technique d'un ou de plusieurs services de conseil spécialisés dans une compétence de production particulière ou dans l'acquisition de machines, d'outils et de matériaux techniques. Enfin, un pays peut recevoir une assistance technique en envoyant des étudiants dans d'autres pays possédant la technologie nécessaire pour suivre une formation et mettre en pratique les compétences nécessaires pour construire et exploiter les systèmes requis. Tous les manuels et documents reçus dans le cadre de cette assistance peuvent être considérés comme des données techniques.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cette technologie est utilisée pour fabriquer des boucliers thermiques de missiles et des inserts de gorge de tuyère de revêtement.

**Autres usages:** Certaines "technologies" peuvent avoir une fonctionnalité dans l'industrie aéronautique militaire ou commerciale, dans la fabrication de matrices et d'outils de formage qui façonnent le verre semi-fondu ainsi que des éléments chauffants, des cibles de pulvérisation et des isolateurs thermiques. Cette technologie peut également être utilisée par les fabricants de verres spéciaux.

**Aspect (sortie d'usine):** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

Catégorie II - Article 7 -  
Réservé pour une utilisation  
future

Catégorie II - Article 8 -  
Réservé pour une utilisation  
future

Catégorie II - Article  
Instrumentation, Navigation  
et radiogoniométrie

## 9.A. Équipement, assemblages et composants

9.A.1. Systèmes d'instruments de vol intégrés comprenant stabilisateurs gyroscopiques ou pilotes automatiques conçus ou modifiés pour être utilisés dans les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2. et composants spécialement conçus à cette fin.

- |                        |                  |
|------------------------|------------------|
| • Chine                | • France         |
| • Allemagne            | • Inde           |
| • Israël               | • Italie         |
| • Japon                | • Norvège        |
| • Fédération de Russie | • Afrique du Sud |
| • Espagne              | • Suède          |
| • Suisse               | • Ukraine        |
| • Royaume Uni          | • États-Unis     |

Production globale



**Nature et But:** Les systèmes d'instruments de vol intégrés utilisent divers capteurs ainsi que des instruments inertiels (accéléromètres et gyroscopes) pour suivre la trajectoire de vol des systèmes de fusées et des UAV. En collectant et en utilisant plus de données que les ensembles de guidage purement inertiels, ces systèmes sont très précis, tandis que les données de capteurs supplémentaires peuvent permettre l'utilisation d'instruments inertiels moins coûteux avec de grandes erreurs dépendantes du temps sans une réduction de la précision globale du système. Les constructeurs ont utilisé divers noms pour les systèmes intégrés d'instruments de vol, tels que les systèmes de navigation intégrés, et les systèmes portant d'autres noms peuvent également être contrôlés sous l'article 9.A.1.

**Mode de fonctionnement:** Les systèmes d'instruments de vol intégrés recueillent et traitent les données en vol des capteurs actifs et passifs, des récepteurs et des

instruments inertiels afin de suivre la trajectoire de vol du missile. Ils utilisent l'un de plusieurs schémas hiérarchiques ou votant pour estimer au mieux la position et pour la comparer à la trajectoire de vol préprogrammée. Les résultats servent à générer des signaux pour diriger le véhicule le long de la trajectoire de vol prévue et pour déclencher d'autres fonctions préprogrammées (telles que la libération de la charge utile) au moment opportun.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les systèmes d'instrumentation de vol intégrés constituent un équipement obligatoire des véhicules aériens sans pilote comme les missiles de croisière.

**Autres usages:** Des systèmes d'instrumentation de vol intégrés sont employés à la fois dans les avions civils et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** Les systèmes d'instruments de vol intégrés sont de toutes tailles et tous aspects car ils sont conçus pour s'adapter à l'intérieur de n'importe quel type de véhicules. Ils utilisent diverses combinaisons

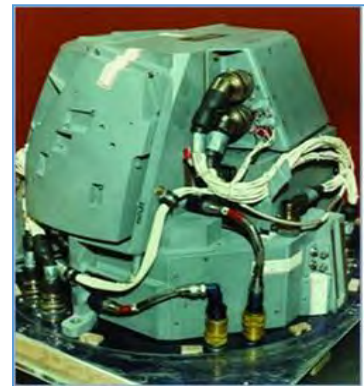


Schéma 74: Corps principal du système d'instrumentation de vol intégré d'un missile de croisière. (Litton Guidance and Control Systems)



de sous-systèmes. Les systèmes conçus pour les missiles de croisière ou d'autres UAV de plus grande taille peuvent mesurer jusqu'à 0,5 m de long et peser plusieurs kilogrammes (Figure 74). D'autres systèmes conçus pour des UAV plus compacts peuvent être aussi petits que 0,2 m x 0,2 m x 0,1 m et peser aussi peu que 1 kg (Figure 75). Comme pour les systèmes de guidage de missiles visés à l'article 2.A.1.d., la plupart des systèmes d'instruments de vol intégrés visés à l'alinéa 9.A.1. sont contenus dans des boîtes métalliques (souvent en aluminium), qui comportent souvent des panneaux d'accès amovibles. Dans certains cas, les composants du système peuvent être répartis dans l'ensemble du missile, certains capteurs et antennes étant situés à bonne distance de l'ordinateur et de l'unité de mesure inertielle (IMU).



**Schéma 75:** Un échantillon de systèmes de navigation intégrés (INS) conçu pour des véhicules aériens sans pilote. De gauche à droite: un pilote automatique et un système de gestion de mission pour véhicule aérien sans pilote et autres applications militaires; un système entièrement intégré d'INS/GPS; un système qui a intégré les gyroscopes, les accéléromètres, le magnétocompteur et le récepteur à semi-conducteur de GPS. (Rockwell Collins)

**Aspect (à l'emballage):** Bien que les systèmes d'instruments de vol intégrés ne soient pas aussi fragiles et coûteux que certains ensembles de guidage de missile balistique, leur conditionnement est généralement solide et comprend des dessiccants et des emballages hermétiques pour les protéger de l'humidité. Ces systèmes sont habituellement expédiés dans des emballages capitonnés et ils portent des étiquettes indiquant qu'il faut les manipuler avec soin.

9.A.2. Gyro-astro-compas et autres appareils permettant de déterminer la position ou l'orientation par poursuite automatique des corps célestes ou des satellites et composants spécialement conçus à cette fin.

**Nature et But:** Les boussoles gyro-astro constituent un assemblage de précision de matériel optique et électromécanique sensible et sont utilisées pour la navigation. Elles permettent une mise à jour du guidage en vol et améliorent ainsi la précision de la navigation.

**Mode de fonctionnement:** Ces dispositifs utilisent un capteur optique pour détecter un point lumineux éloigné dans une direction connue. Ils utilisent généralement les étoiles, mais se servent également des satellites sur orbites connues. L'ordinateur de guidage compare la direction prévue de l'étoile par rapport à la trajectoire en cours avec sa direction mesurée et envoie des signaux au système de contrôle de vol pour faire toutes les corrections de trajectoire nécessaires.

- France
- Allemagne
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

## Production globale



lentille optique visible qui peut être protégée par un volet automatique ou une trappe. Beaucoup de télescopes sont montés sur cardan (c'est-à-dire montés sur un ou plusieurs camps pivotants) et peuvent être automatiquement dirigés pour localiser une référence optique. Une unité classique peut mesurer moins de 50 cm et peser moins de 10 kg. Un cliché de boussole gyro-astro est présenté à la Figure 76. Les boussoles sans cardan se composent d'un capteur optique avec des surfaces de fixation de précision, un obturateur et de l'électronique de soutien. Leur boîtier métallique mesure souvent seulement de 5 à 7 cm de côté et pèse approximativement 0,5 kg.

**Aspect (à l'emballage):** Étant donné que les boussoles gyro-astro sont des instruments fragiles, elles sont habituellement conditionnées dans des emballages d'expédition robustes qui les protègent de l'humidité et des chocs moyens. Les emballages d'expédition portent habituellement des avertissements indiquant qu'ils contiennent un assemblage fragile et coûteux d'équipement optique, électrique, ou mécanique.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les boussoles gyro-astro sont utilisées dans des missiles qui parcourent une partie de leur trajectoire au-dessus de l'atmosphère

**Autres usages:** Les boussoles gyro-astro sont utilisées sur des sondes spatiales et certains avions, ainsi que sur quelques bateaux pour faciliter la navigation.

**Aspect (sortie d'usine):** Les progrès réalisés dans la technologie des capteurs optique ont permis de réduire leur taille et leur poids et sont susceptibles de perdurer. Bien que les boussoles gyro-astro varient considérablement dans leur conception, les capteurs optiques, ou télescopes, sont tous équipés d'une



Schéma 76: Photographie haute définition de boussole gyro-astro. (Litton Alenia Difesa)

9.A.3. Accéléromètres linéaires conçus pour être utilisés dans des systèmes de navigation à inertie ou des systèmes de guidage de tous types, utilisables dans les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2, présentant toutes les caractéristiques ci-après, et leurs composants spécialement conçus:

- a. «Répétabilité» de «facteur d'échelle» inférieure à (meilleure que) 1 250 ppm; et
- b. «Répétabilité» de «biais» inférieure à (meilleure que) 1 250 micro g.

**Note:**

L'article 9.A.3. ne vise pas les accéléromètres qui sont spécialement conçus et développés comme capteurs MWD (technique de mesure pendant forage) pour utilisation dans des opérations de forage.

**Notes techniques:**

1. Le «biais» est défini comme la sortie d'un accéléromètre en l'absence d'accélération.
2. Par «facteur d'échelle», on entend le rapport entre une modification à la sortie et une modification à l'entrée.
3. La mesure du «biais» et du «facteur d'échelle» correspond à un écart type d'un sigma par rapport à un étalonnage fixe sur une période d'un an.
4. La «répétabilité» est définie, selon la norme IEEE 528-2001 relative à la terminologie 5282001 des capteurs inertiels dans la section Définitions, paragraphe 2.214 intitulée répétabilité (gyroscope, accéléromètre), comme suit: La concordance entre des mesures répétées de la même variable dans les mêmes conditions de fonctionnement lorsque des changements dans les conditions ou des périodes de non fonctionnement surviennent entre les mesures.

- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Norvège
- Fédération de Russie
- Suède
- Royaume Uni
- États-Unis
- France
- Inde
- Italie
- Corée du Nord
- Pakistan
- Afrique du Sud

Production  
Globale



**Nature et But:** Les accéléromètres sont des éléments sensibles de matériel électromécanique utilisés pour mesurer l'accélération, c'est-à-dire le taux de changement de vitesse d'une trajectoire donnée. L'accélération est intégrée une première fois pour indiquer la vitesse et réintégré pour fournir la distance parcourue depuis le point d'origine ou de lancement.

La précision du missile dépend directement de la qualité de ses accéléromètres et gyroscopes; les missiles destinés à de longs vols sans mises à jour externes exigent des accéléromètres de qualité. Les missiles qui utilisent des systèmes de capteurs tels que des récepteurs GNSS (Global Navigation Satellite Systems), des repères stellaires ou des capteurs de reconnaissance du terrain pour effectuer des corrections en plein vol peuvent utiliser des accéléromètres de qualité inférieure (Figure 77). Une grande partie du coût des accéléromètres inertiels de haute qualité résulte des nombreux essais d'étalonnage qui doivent être effectués sur chaque unité.



Schéma 77: Cet accéléromètre est utilisé dans de nombreux systèmes de navigation inertielle à strapdown commerciaux et militaires (Honeywell)

**Mode de fonctionnement:** Les accéléromètres reçoivent l'alimentation électrique, perçoivent l'accélération et fournissent des informations de mesure sous forme de signal électrique. Les données fournies par l'accéléromètre, couplées aux informations sur l'horaire, la gravité locale, l'orientation et d'autres mesures possibles, permet au système de guidage ou d'instrumentation en vol intégré de déterminer la vitesse du véhicule, sa trajectoire et sa position. Il existe plusieurs types d'accéléromètres qui ont chacun leur propre mode de fonctionnement.

Beaucoup d'accéléromètres pendulaires (souvent appelés accéléromètre à rééquilibrage de force ou à équilibrage des forces) utilisent un petit poids sur une charnière flexible qui est maintenue contre les forces de la gravité et de l'accélération par un champ magnétique. Les variations sur ce modèle sont nombreuses, mais les principes restent plus ou moins identiques. Le petit poids est maintenu en position nulle par un électro-aimant. Lorsque l'accélération change, le poids se déplace et les circuits de commande modifient le courant dans l'électro-aimant afin de ramener le poids en position nulle. La quantité de courant nécessaire à ce remplacement, ou rééquilibrage, est proportionnelle à l'accélération. Un accéléromètre pendulaire commun utilisé dans les systèmes de navigation et de guidage est connu sous le nom d'accéléromètre Q-Flex (quartz flexure). La charnière et la structure pendulaire monobloc sont fabriquées en quartz fondu, un matériau très stable et non conducteur. L'accélération appliquée produit un couple sur l'ensemble de masse résistant au quartz. Le déplacement capté par un détecteur produit une tension de sortie proportionnelle. Cette sortie est amplifiée et conditionnée, puis alimentée à une bobine de couple fixée à la masse d'épreuve. Le courant traversant la bobine, dans le champ magnétique permanent, développe un couple de rétablissement égal et opposé à l'accélération appliquée. Le même courant passe par une résistance de charge externe générant une tension de sortie proportionnelle à l'accélération appliquée.

Un gyroscope à masse en rotation avec une masse non équilibrée ajoutée le long de son axe de rotation peut être utilisé comme accéléromètre. Le gyroscope tourne autour d'un pivot perpendiculaire à son axe de rotation à une vitesse proportionnelle à l'accélération dont la gravité. La somme de ces révolutions sert d'intégration mécanique de l'accélération pour fournir un rendement proportionnel à la vitesse plutôt qu'à l'accélération. Les accéléromètres de ce type sont connus sous le nom d'accéléromètres gyroscopiques pendulaires intégrants (PIGAs)(Figure 78). Les PIGA peuvent être très coûteux et ont été utilisés dans certains des systèmes de missiles balistiques à longue portée les plus précis.

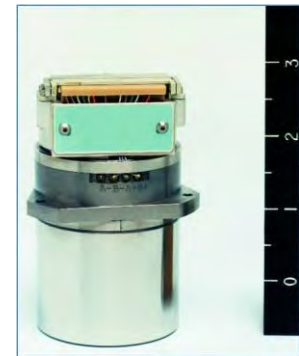


Schéma 78: Un accéléromètre gyro-intégrateur pendulaire (PIGA) à côté d'une règle graduée en pouces. (The Charles Stark Draper

Il existe également d'autres types d'accéléromètres tels que les accéléromètres à éléments vibrants qui font varier la tension et la fréquence d'un élément vibrant. Les accéléromètres sur puce emploient une partie flexible du semi-conducteur de microcircuit pour modifier la résistance électrique et pour produire un signal électrique (Figure 79). Les accéléromètres de ce type se situent à l'extrémité inférieure de la plage de performance, mais les efforts de conception se poursuivront en raison du potentiel de réduction substantielle des coûts. Ces accéléromètres modernes sont déjà utilisés dans les UMI nécessitant un degré de précision inférieur.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les accéléromètres sont utilisés dans des systèmes de guidage de missile ou d'instrumentation de vol intégrés. Généralement, trois accéléromètres montés perpendiculairement les uns aux autres fournissent toutes les données de mesure de l'accélération nécessaires à la navigation inertielle. Ils peuvent être installés sur un cardan (voir 2.A.1.d.), être montés dans une boule de flottement, ou être fixés (en strapdown) à l'armature du missile. Combinés avec des gyroscopes, ils forment une centrale inertielle ou un capteur inertielle. Selon les conditions de mission, certains véhicules sans pilote, comme les missiles de croisière, peuvent se contenter d'un ou deux accéléromètres.

**Autres usages:** Les accéléromètres sont utilisés dans des appareils civils et militaires et des systèmes spatiaux, lors de tests de tension dans le perçage de puits de pétrole, en tant que navigateurs à inertie dans les voitures et autres véhicules terrestres et dans le matériel électronique, les appareils de mesure de la gravité, la robotique, et les manèges de foire (montagnes russes). Cependant, la plupart de ces utilisations n'exigent pas la stabilité à toute épreuve et la précision fortement calibrée des accéléromètres à inertie

**Aspect (sortie d'usine)** Il existe de nombreux modèles d'accéléromètres dont l'apparence varie considérablement. Ils sont généralement cylindriques, métalliques et brillants, issus de l'usinage de précision. Les accéléromètres plus grands utilisés dans les missiles balistiques mesurent plusieurs centimètres de long et peuvent peser jusqu'à plusieurs kilogrammes. Ceux utilisés dans les UAV, y compris les missiles de croisière, sont plus petits et plus légers; ils peuvent ne mesurer que quelques centimètres sur un côté et peser moins d'un kilogramme. De nombreux accéléromètres MTCR présentent des connexions électriques de haute qualité et des surfaces de montage de précision pour un alignement parfait. De nombreux accéléromètres sont des instruments scellés en usine, qui ne sont généralement pas démontés ou même ouverts pour la maintenance par un client. Le modèle et le numéro de série à l'extérieur de l'accéléromètre doivent figurer sur la documentation associée, qui contient des informations sur la précision.

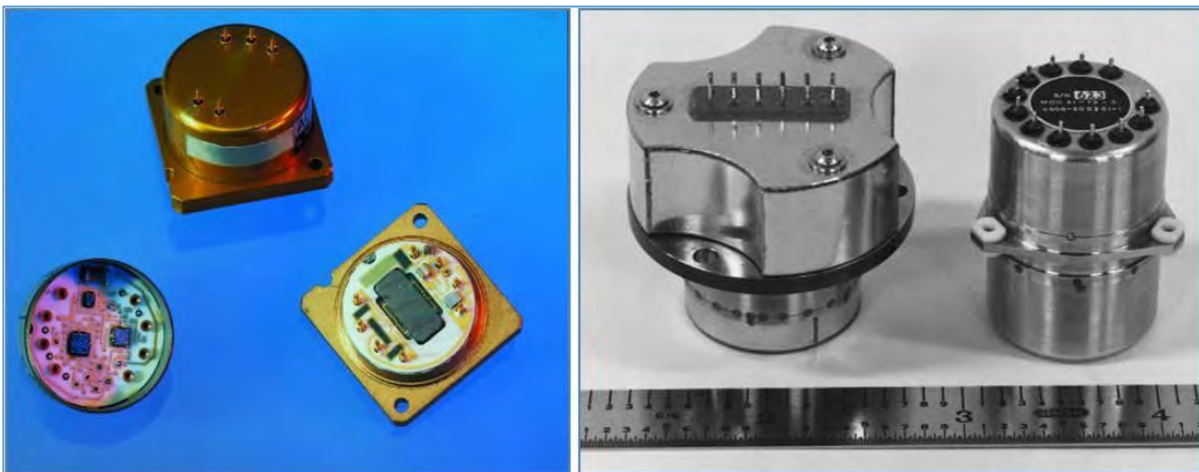


Schéma 79: *Gauche*: Un accéléromètre à circuit intégré. (Litton Sextant Avionique) *À droite*: Deux accéléromètres à rééquilibrage de force qui peuvent être conçus selon n'importe quelle capacité de performance. (Systèmes fédéraux Lockheed Martin)



La distinction entre les accéléromètres du MTCR et les autres par simple inspection visuelle peut être difficile car si les modèles ne présentent pas tous les mêmes performances, ils peuvent être identiques en apparence. Les informations pertinentes propres à chaque modèle et à chaque accéléromètre numéroté en série peuvent être tirées de la documentation associée (souvent appelée feuille d'étalonnage ou données d'étalonnage), y compris le seuil g et l'erreur de linéarité. Les tests exhaustifs nécessaires à la compilation des données d'étalonnage sont un facteur important qui rend un accéléromètre suffisamment précis pour être utilisé dans des systèmes de guidage de missiles sophistiqués. Ainsi, le détail et la quantité d'erreurs de calibrage et de modélisation des données dépendant de chaque accéléromètre constituent des indicateurs-clé pour déterminer l'utilisation d'un accéléromètre appliquée aux missiles.

**Aspect (à l'emballage):** Parce qu'ils sont conçus pour être sensibles à l'accélération, les accéléromètres de précision sont vulnérables aux dommages causés par des chocs relativement mineurs. Ils sont généralement protégés contre les chocs physiques dans de petits emballages de haute qualité avec une doublure en mousse épaisse et profilée, un peu comme un emballage pour une montre de poche fine. Pour l'expédition, une ou plusieurs de ces boîtes spéciales sont emballées dans une autre boîte ou un autre conteneur avec une doublure matelassée. La documentation sur la précision de chaque modèle et de chaque accéléromètre numéroté en série est généralement contenue dans son emballage.

9.A.4. Tous les types de gyroscopes utilisables dans les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2, ayant une «stabilité» de «vitesse de précession» de moins de  $0,5^\circ$  (1 sigma ou rms) par heure dans un environnement de 1 g et composants spécialement conçus à cet effet.

**Notes techniques:**

1. La vitesse de précession se définit comme la valeur de sortie d'un gyroscope qui est fonctionnellement indépendante de la rotation d'entrée; elle est exprimée en vitesse angulaire (norme IEEE 528-2001, par. 2.56).
2. La stabilité se définit comme la mesure de la capacité d'un mécanisme donné ou d'un coefficient de performance de rester invariable lorsqu'il est soumis en continu à une condition de fonctionnement fixe (cette définition ne fait pas référence à la stabilité dynamique ni à la stabilité d'asservissement)(IEEE STD 528-2001 paragraphe 2.247)

- Autriche
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Pakistan
- Afrique du Sud
- Royaume Uni
- États-Unis
- Canada
- France
- Inde
- Italie
- Corée du Nord
- Fédération de Russie
- Suède

Production globale



**Nature et But:** Les gyroscopes, ou gyros, sont des appareils électromécaniques ou électro-optiques sensibles qui mesurent la rotation autour d'un ou plusieurs axes sensibles. Les gyroscopes sont généralement montés avec des accéléromètres dans l'ensemble de guidage ou le système d'instruments de vol intégré. Ils mesurent tout changement dans l'orientation angulaire des accéléromètres, de sorte que la direction des mesures de l'accéléromètre est connue. L'un des paramètres de performance les plus importants réside dans la stabilité du taux de dérive, habituellement mesuré en fractions de degré par heure. Ceci détermine la vitesse à laquelle le gyroscope perd la connaissance de son orientation. Pour les gyroscopes utilisés dans des systèmes de guidage fixés à la structure (en strapdown), la stabilité du facteur d'échelle (le facteur rapportant le taux de rotation ou l'angle senti au signal de sortie du gyroscope) est également primordiale.



La précision du missile dépend directement de la qualité de ses accéléromètres et gyroscopes; les missiles destinés à de longs vols sans mises à jour externes exigent des accéléromètres de qualité. Les missiles qui utilisent des systèmes de capteurs tels que des récepteurs GNSS (Global Navigation Satellite Systems), des repères stellaires ou des capteurs de reconnaissance du terrain pour effectuer des corrections en plein vol peuvent utiliser des gyros de qualité inférieure. Une grande partie du coût des gyroscopes inertiels de haute qualité résulte des nombreux essais approfondis qui doivent être effectués sur chaque unité.

**Mode de fonctionnement:** Les gyroscopes détectent les déplacements angulaires (changements d'orientation) et fournissent des informations de mesure, sous la forme d'un signal électrique. Les informations d'orientation des gyroscopes, ainsi que les informations sur l'heure, la gravité locale, l'accélération et éventuellement d'autres mesures, permettent d'estimer la vitesse, le cap et la position du véhicule à l'aide de l'ensemble de guidage ou du système d'instruments de vol intégré.

Il existe plusieurs types de gyroscopes différents, chacun ayant son propre mode de fonctionnement. La plupart des missiles à guidage inertiel utilisent soit des gyroscopes à masse rotative, soit des gyroscopes électro-optiques.

Les gyroscopes à masse en rotation contiennent un disque de filage et fonctionnent selon le principe gyroscopique, c'est-à-dire qu'un couple proportionnel mesurable est généré perpendiculairement à la perturbation angulaire. Il existe deux types courants de gyroscopes de masse en rotation. Les gyroscopes à un seul degré de liberté (SDF) détectent la rotation autour d'un seul axe, tandis que les gyroscopes à deux degrés de liberté (TDF) détectent la rotation autour de deux axes. Étant donné que les systèmes de guidage de missiles nécessitent généralement une connaissance de l'orientation pour les trois axes, trois gyroscopes SDF sont nécessaires, mais seulement deux gyroscopes TDF (un axe sera redondant).

Un gyroscope SDF a l'axe transversal suspendu de la masse en rotation à l'intérieur d'un cylindre qui flotte à l'intérieur d'un autre cylindre légèrement plus grand fixé à la plate-forme de guidage. De nombreux modèles font flotter le cylindre intérieur dans un liquide tandis que d'autres le suspendent avec un écoulement gazeux. Les rotations du cylindre intérieur flottant sont liées aux changements d'orientation d'entrée par l'effet gyroscopique de la masse en rotation. La mesure de ces rotations ou la mesure de la force nécessaire pour empêcher ces rotations est la sortie du gyroscope SDF.



**Schéma 80:** Ce gyroscope à suspension dynamiquement accordée dans les centrales inertiels et le guidage de missiles est utilisé dans toute une gamme d'applications militaires, comme (Northrop Grumman)

Le gyroscope TDF le plus couramment utilisé est le gyroscope à accord dynamique (DTG) (Figure 80). Il n'utilise pas de liquide de flottaison, c'est pourquoi on l'appelle parfois un gyroscope accordé "sec". La masse en rotation d'un DTG est suspendue à un ensemble complexe de charnière flexible à cardan, essentiellement une articulation universelle d'ultra-précision. La charnière complexe est réglée de façon à ce que ses couples d'erreur s'annulent à une vitesse spécifique, souvent supérieure à 10 000 tr/min. Les DTG ont besoin d'une très bonne régulation de vitesse pour fonctionner de manière fiable au régime réglé. Les anciens types de gyroscopes TDF se composent d'une série de cardans mécaniques qui isolent le rotor de filature

du boîtier. La position angulaire de la masse à filer par rapport au boîtier est utilisée pour mesurer les changements d'orientation de la plate-forme.

Les gyroscopes électro-optiques génèrent des faisceaux de lumière laser à contre-rotation autour d'un chemin fermé pour former un motif d'interférence qui est détecté par un détecteur. Lorsqu'il y a rotation autour d'un axe qui n'est pas dans le plan de la boucle, la différence dans les longueurs effectives des trajectoires respectives crée un décalage relatif de la configuration d'interférence. Ce décalage (connu sous le nom d'effet Sagnac) est observé par le détecteur, qui fournit une sortie proportionnelle à la rotation du gyroscope.

Les deux types de gyroscopes optiques les plus répandus sont le gyroscope à laser annulaire (RLG) et le gyroscope à fibre optique (FOG). Il existe plusieurs variations de chaque modèle. Les RLG produisent leurs rayons laser contrarotatifs à l'intérieur de tubes à gaz, des cavités configurées dans un chemin polygonal fermé, souvent triangulaires mais parfois à quatre ou cinq côtés. Ces cavités sont faites en verre pour une dilatation thermique proche du zéro et donc pour une plus grande précision. Les FOG utilisent de longues bobines de câble en fibre optique pour porter les faisceaux contrarotatifs.

Une différence importante entre les RLG et les FOG est que la bobine de câble à fibre optique donne au FOG une longueur de chemin optique beaucoup plus longue et, du moins en théorie, une meilleure précision. Dans la pratique, cette amélioration est toutefois compensée par des imperfections dans les câbles à fibres optiques et les interfaces de câbles.

Les FOG sont conçus comme des gyroscopes à axe unique, de sorte que la plupart des missiles qui les utilisent auront besoin de trois pour suivre les rotations autour des trois axes; il en va de même pour les RLG à anneau unique. Parfois, on utilise des RLG multi-axes qui contiennent trois anneaux ou plus dans un seul bloc de verre; une seule unité de ce type serait nécessaire dans un ensemble de guidage.

D'autres types de gyroscopes incluent le gyroscope résonant hémisphérique, qui établit et surveille une onde de vibration debout dans une coupe hémisphérique (un peu comme un petit verre à vin). Il existe également des modèles tels que les petits diapasons qui fonctionnent par une méthode faisant appel à la force de Coriolis. Toutefois, tout gyroscope capable de répondre aux spécifications de performance du MTCR est contrôlé quel que soit son mode de fonctionnement.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les gyroscopes sont utilisés dans le système de guidage d'un missile ou le système d'instruments de vol intégré qui détecte les changements d'orientation de l'accéléromètre. Les modèles peuvent utiliser deux, trois ou quatre gyroscopes. Ils sont habituellement montés perpendiculairement entre eux afin de fournir des données de mesures angulaires selon trois axes. Ils peuvent être utilisés dans une structure de cardan (voir l'article 2.A.1.d.), montés dans une boule de flottement, ou apposés à un bloc lui-même fixé à la cellule d'avion du missile en strapdown. Combiné avec des accéléromètres, elles composent la centrale inertielle ou le capteur inertielle.

**Autres usages:** Les gyroscopes sont utilisés dans les systèmes de guidage non missiles, les systèmes d'instruments de vol intégrés, les gyrostabilisateurs, les pilotes automatiques et l'équipement de navigation. Les applications militaires comprennent l'artillerie, les chars, les navires et les aéronefs. Les applications commerciales comprennent les navires, les aéronefs et le forage pétrolier. Dans la plupart des applications non liées aux missiles, les gyroscopes peuvent être plus petits, moins coûteux et moins complexes parce que les environnements d'exploitation et les exigences de précision sont habituellement moins exigeants.



Schéma 83: Un FOG (à gauche), un RLG (au centre), et un accéléromètre (à droite). (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))



Schéma 82: Un gyroscope dynamiquement accordé (The Charles Stark Draper



Schéma 81: Un gyroscope mécanique vibrant. (British Aerospace Ltd.)

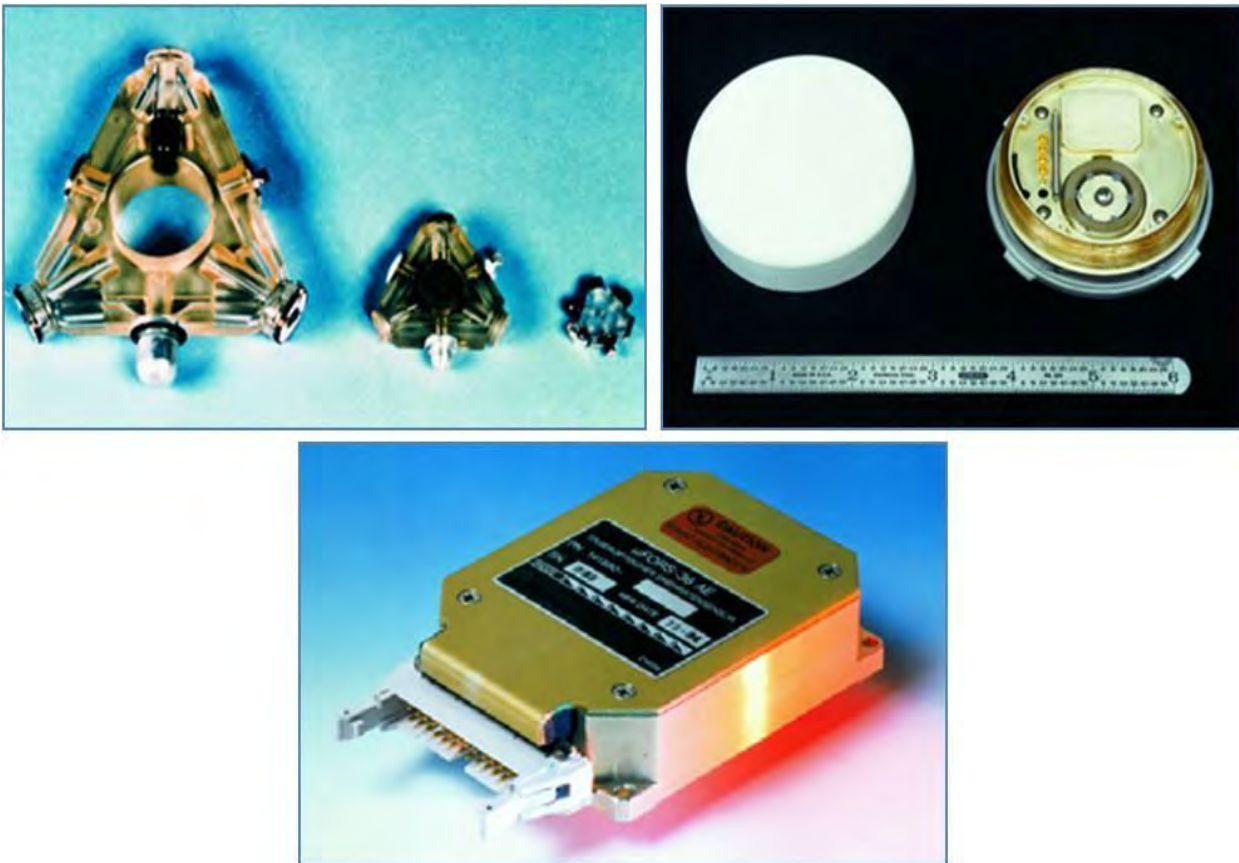


Schéma 84: trois RLG présentés sans leur matériel électronique associé (Honeywell) en haut à droite: un gyroscope à fibre optique sans couvercle. (Honeywell) en bas: un gyroscope à fibre optique, capteur de fréquence. Il mesure 2 cm x 6,5 cm x 8 cm. (LITEF)

**Aspect (sortie d'usine):** Les gyroscopes à un degré de liberté modernes peuvent mesurer de 5 à 8 cm de diamètre et de 8 à 12 cm de long, et peser jusqu'à 1 kg. Les gyroscopes dynamiquement accordés sont cylindriques avec un diamètre allant de 4 à 6 cm, une longueur de 4 à 8 cm et un poids classique d'environ 1 kg. Des gyroscopes plus anciens peuvent être légèrement plus grands, approximativement deux fois la taille des plus récents, et peser plusieurs kilogrammes. Les gyroscopes utilisés dans des véhicules sans pilote, dont les missiles de croisière, peuvent être beaucoup plus petits et plus légers, pour un poids de seulement quelques dizaines de grammes.



**Schéma 85:** Une centrale inertielle de catégorie tactique est un capteur de mouvement très performant basé sur le gyroscope à fibre optique utilisé dans les systèmes de guidage et de navigation des véhicules sans pilote. (KVH)

De nombreux gyroscopes abordés dans le RTCM ont des surfaces de fixation de précision pour des alignements précis et des raccordements électriques de haute qualité. En raison du nombre de conceptions, l'aspect des gyroscopes varie considérablement. Les gyroscopes à masse rotative sont

habituellement cylindriques, métalliques, lourds pour leur taille, et brillants grâce à l'assemblage de précision.

Les différents gyroscopes optiques ressemblent généralement à un plateau et sont fixés dans un boîtier bas et scellé. Une unité RLG à trois anneaux est le plus souvent cubique et mesure entre 4 et 10 cm de côté. Elle peut peser entre quelques fractions d'un kilo à plus d'un kilo. Certains modèles à un seul axe ressemblent à des cylindres avec des diamètres dépassant les 20 cm. Certains modèles de FOG mesurent seulement 2 à 4 cm de diamètre, contiennent une fibre optique de plusieurs centaines de mètres de long et pèsent quelques fractions d'un kilo.

Les gyroscopes contrôlés et non contrôlés par le MTCR peuvent sembler identiques. Les informations pertinentes propres à chaque modèle et à chaque gyroscope numéroté en série peuvent être tirées de la documentation associée (feuille ou données d'étalonnage), y compris la stabilité de la vitesse de dérive. Comme pour les accéléromètres, les essais exhaustifs nécessaires pour compiler ces données d'étalonnage constituent une partie substantielle de ce qui rend un gyroscope suffisamment précis pour être utilisé dans un ensemble de guidage de missile. Ainsi, le détail et la quantité des données d'étalonnage et de modélisation des erreurs associées à chaque gyroscope sont essentiels pour déterminer l'utilisation d'un gyroscope en rapport avec les missiles. Les données d'étalonnage indiquent normalement un numéro de série visible sur le gyroscope.

**Aspect (à l'emballage):** Les gyroscopes à masse rotative sont sensibles aux dommages causés par le choc, mais les gyroscopes optiques sont assez solides. Les gyroscopes à masse rotative sont conditionnés dans des emballages capitonnés de haute qualité. Les gyroscopes optiques n'ont pas besoin d'autant de rembourrage dans leur emballage, mais ils peuvent aussi être expédiés dans des paquets de haute qualité utilisés pour les instruments et capteurs électroniques coûteux.



9.A.5. Les accéléromètres ou gyroscopes de tous types, conçus pour les systèmes de navigation par inertie ou pour les systèmes de guidage de tous types à des niveaux d'accélération supérieurs à 100 g et composants spécialement conçus à cette fin.

**Note:**

*L'article 9.A.5. ne vise pas les accéléromètres conçus pour mesurer les vibrations ou les chocs.*

- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Pakistan
- Royaume Uni
- États-Unis
- France
- Inde
- Italie
- Corée du Nord
- Fédération de

Production globale



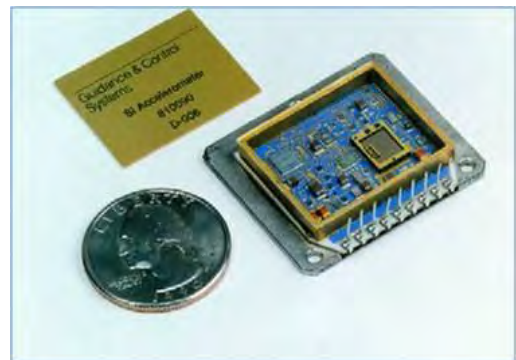
**Nature et But:** Les accéléromètres et les gyroscopes conçus pour fonctionner à des niveaux d'accélération supérieurs à 100 g constituent une catégorie spéciale d'accéléromètres et de gyroscopes, qui peuvent comprendre ceux des points 9.A.3 et 9.A.4, respectivement. Ces appareils produisent des signaux ininterrompus sur toute leur plage de fonctionnement et sont conçus pour fonctionner sous des accélérations extrêmes supérieures à 100 g. Tous ces appareils sont contrôlés en vertu de cet article, quelles que soient les spécifications de performance. Leur but est de fournir des données d'instruments inertiels sous de fortes accélérations comme celles que subissent les véhicules de rentrée (RVs) pendant l'évitement de défense et la décélération de rentrée. Ces instruments peuvent également être utilisés dans le cadre d'un système de mise à feu. Aucune spécification de précision

n'est incluse parce que les instruments dont la précision est nettement inférieure peuvent être utilisés en raison de leur durée de fonctionnement relativement courte.

**Mode de fonctionnement:** Ces instruments à inertie fonctionnent plus ou moins de la même façon que ceux présentés aux articles 9.A.3 et 9.A.4., mais ils sont renforcés et disposent d'une plus grande portée de fonctionnement (au-dessus de 100 g).

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces accéléromètres peuvent être utilisés comme fusées dans les véhicules récréatifs. Des accéléromètres et des gyroscopes à sortie continue sont utilisés dans les ensembles de guidage qui dirigent les véhicules récréatifs manœuvrant en évitant les défenses ou en se guidant vers une cible. Ces accéléromètres et gyroscopes sont assez précis et probablement durcis par rayonnement. Les accéléromètres à sortie continue de plus de 100 g sont également utilisés dans les mécanismes de mise à feu et de mise à feu des missiles de croisière à ogive pénétrante.

**Autres usages:** Les accéléromètres et gyroscopes capables de fonctionner dans un environnement de 100 g peuvent être utilisés dans les munitions guidées telles que les obus d'artillerie. Ces accéléromètres sont également utilisés dans les laboratoires pour les essais à forte intensité de rayonnement qui nécessitent une sortie continue.



**Schéma 86: Un accéléromètre à circuit intégré évalué à plus de 100 g. (Manuel d'annexe d'équipement, logiciel et technologie RCTM, troisième édition (mai 2005))**

**Aspect (sortie d'usine)** Les accéléromètres peuvent sembler identiques à ceux présentés à l'article 9.A.3. (Figure 86). De même, les gyroscopes destinés à fonctionner à des niveaux supérieurs à 100 g peuvent également être d'apparence pratiquement identique à ceux présentés à l'article 9.A.4. Ils tous sont généralement cylindriques ou en forme de plateau avec des brides de fixation de précision et des prises électriques de qualité. Étant donné que plus les instruments sont petits, plus ils résistent à la gravité, ils tendent à être moins volumineux que la plupart des autres accéléromètres et gyroscopes. Il existe même des accéléromètres de haute gravité miniatures intégrés dans des éléments de circuit.

**Aspect (à l'emballage):** En raison de leur résistance, ces instruments n'ont pas besoin de manipulation particulière. Ils sont expédiés avec le petit matériel. La documentation sur la gravité de fonctionnement de chaque modèle et unité avec numéro de série est généralement incluse dans son paquet.



9.A.6: «Équipement à inertie ou autre équipement» se servant des accéléromètres visés aux articles 9.A.3. ou 9.A.4. ou des gyroscopes visés aux articles 9.A.4. ou 9.A.5, systèmes comprenant un tel équipement et composants spécialement conçus à cette fin.

Note:

L'article 9.A.6. Comprend:

- a. Systèmes de référence d'attitude et de cap (SRSA);
- b. Gyrocompas;
- c. Unités de mesure inertielle (UMI);
- d. Systèmes de navigation inertielle (INS)
- e. Systèmes de référence inertiels (IRS)
- f. Unités de référence inertielle (IRU).

Notes techniques:

Les «équipements ou systèmes de mesure inertielle» visés à l'article 9.A.6. comprennent des accéléromètres ou des gyroscopes pour mesurer les changements de vitesse et d'orientation afin de déterminer ou de maintenir le cap ou la position sans avoir besoin de référence externe une fois alignés

- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Pakistan
- Afrique du Sud
- Suède
- Ukraine
- États-Unis
- France
- Inde
- Italie
- Norvège
- Fédération de Russie
- Espagne
- Suisse
- Royaume Uni

Production  
globale



**Nature et But:** Cet article de l'annexe du MTCR garantit que tous les accéléromètres et gyroscopes visés à l'article 9 demeurent contrôlés lorsqu'ils font partie d'un ensemble plus vaste utilisé pour la navigation et la radiogoniométrie. Des exemples de tels assemblages comprennent les UMI et les ensembles de guidage complets qui ne sont pas visés au point 2.A.1.d. Tout équipement ou système de mesure inertielle est classé dans la catégorie II du présent point s'il contient un ou plusieurs des points 9.A.3, 9.A.4 ou 9.A.5.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cet équipement est utilisé dans les dispositifs de guidage et les systèmes intégrés d'instruments de vol pour missiles balistiques et UAV, y compris les missiles de croisière, comme décrit aux points 2.A.1.d. et 9.A.1.

**Autres usages:** Cet équipement peut également être utilisé dans des systèmes de guidage et de navigation pour toute une palette de vols spatiaux, d'aviation, de cartographie de la gravité, de navigation maritime et terrestre et dans la percée de puits.

**Aspect (sortie d'usine)** L'aspect de l'équipement à inertie ou autre qui utilisent des accéléromètres ou des gyroscopes varie considérablement. Les centrales inertielle peuvent être conçues pour être montées fixement en strapdown. L'équipement qui utilise des accéléromètres et des gyroscopes peut également avoir recours à des capteurs optiques, des récepteurs satellites comme le GNSS, des unités de radar, des capteurs d'horizon, des ordinateurs et logiciels et d'autres articles, selon les applications particulières. L'équipement dispose de prises électriques et de surfaces de fixation et peut avoir des panneaux d'accès démontables pour remplacer les accéléromètres, les gyroscopes ou d'autres sous-éléments.

Ils varient en taille et en poids selon l'application. La centrale inertielle représentée sur la Figure 88 fait 8 cm de hauteur, seulement 8,5 cm de diamètre et pèse 750 g.

**Aspect (à l'emballage):** Comme de nombreux accéléromètres et gyroscopes sont par nature délicats, ils sont emballés dans des conteneurs d'expédition robustes avec rembourrage et isolation pour éviter les dommages dus aux chocs et à l'humidité. Les contenants peuvent être en bois, en métal ou en plastique avec rembourrage en mousse. Les emballages d'expédition sont susceptibles de porter les étiquettes de mise en garde habituellement utilisées sur les contenants d'ensembles coûteux d'équipement électrique ou mécanique sensible.



Schéma 87: Une centrale inertielle utilise les FOG et les accéléromètres micro-usinés. Elle est employée dans la stabilisation de l'espace, le guidage de missiles, les guidages de véhicules sans pilote et la commande de vol. (Northrop Grumman)

9.A.7. «Systèmes de navigation intégrés» spécialement conçus ou modifiés pour les systèmes mentionnés à l'article 1.A. 19.A.1. ou 19.A.2. et capables de fournir une précision de navigation de 200 m ECP ou moins.

**Notes techniques:**

Un «système de navigation intégré» comporte normalement les éléments suivants:

- a. Un dispositif de mesure inertielle (par exemple un système de référence de cap et d'assiette, une unité de référence inertielle ou un système navigation inertielle);
- b. Un ou plusieurs détecteurs externes utilisés pour corriger la position et/ou la vitesse, soit périodiquement soit de manière continue tout au long du vol (par exemple récepteur pour la navigation par satellite, altimètre radar et/ou radar Doppler); et
- c. Des matériels et logiciels d'intégration.

*N.B. En ce qui concerne le «logiciel» d'intégration, voir 9.D.4.*

- Argentine
- Brésil
- Danemark
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Corée du Sud
- Suisse
- Royaume Uni
- États-Unis
- Australie
- Chine
- France
- Inde
- Italie
- Fédération de Russie
- Suède
- Ukraine

Production globale



**Nature et But:** Les systèmes de navigation intégrés sont composés de capteurs de mise à jour à faible débit (p. ex. récepteur GPS, 1-20 Hz) et de capteurs de propagation à haut débit (p. ex. composants inertiels, 50- 1 000 Hz) pour fournir à la plate-forme hôte une position, une vitesse et une attitude solides. Le logiciel de traitement peut s'exécuter sur l'un des processeurs du capteur ou sur une plate-forme informatique externe.

Les capteurs de mise à jour et de propagation servent à des fins différentes et ont des caractéristiques d'erreur complémentaires. Les capteurs de mise à jour tels que les GNSS, les altimètres radar et les radars Doppler produisent des solutions de position et/ou de vitesse par mesure directe et chaque solution contient un niveau d'erreur indépendant. Les capteurs de propagation tels que les composants inertiels (accéléromètres et gyroscopes) mesurent les changements progressifs de la vitesse et l'attitude qui doivent être intégrées pour produire des comparaisons avec les capteurs de mise à

jour. Les capteurs de propagation fournissent la base d'une solution d'attitude puisqu'ils mesurent les changements d'attitude par rapport à l'espace inertielle. Les capteurs de mise à jour ne sont pas en mesure de fournir une mesure instantanée de l'attitude.

Il existe différents types de composants de mesure inertielle qui déterminent les exigences de mise à jour de la vitesse du capteur. Les systèmes inertiels pour les applications de défense sont généralement regroupés en catégories tactique, navigation et marine et se distinguent principalement par la qualité de leurs composants gyroscopiques.

**Mode de fonctionnement:** Avant de fournir une solution de navigation, une plate-forme inertielle doit être alignée. Il s'agit du processus par lequel son estimation de l'attitude est affinée pour correspondre à celle de sa plate-forme hôte par rapport à une plate-forme locale de navigation horizontale

On suppose que les angles de montage du système de navigation par rapport à la plate-forme hôte sont connus et n'ont pas besoin d'être estimés. Selon la plate-forme hôte, cela peut se faire par un processus d'alignement statique, en mouvement ou de transfert.

Pendant l'alignement statique, le gyrocompas (c.-à-d. la mesure de la vitesse de rotation de la terre) est utilisé pour trouver l'angle d'inclinaison et les accéléromètres sont utilisés pour déterminer les angles de tangage et de roulis. Avec l'alignement en mouvement, les erreurs dans l'estimation de l'attitude dérivée de l'inertie sont réduites en comparant la solution de navigation inertielle propagée à celle du système de mise à jour pendant plusieurs périodes de mesure. Enfin, pour une arme portée, l'alignement de transfert peut être utilisé pour reproduire la solution d'attitude du véhicule hôte (de son système de navigation) à la plate-forme de l'arme.



Schéma 88: Une centrale inertielle et un GPS. (Northrop Grumman)

Une fois que la solution d'attitude inertielle a convergé, les mesures de l'accéléromètre sont mécanisées à la vitesse de propagation inertielle de leur cadre de coordonnées de mesure au cadre de navigation au niveau local. Les mesures d'accélération transformées sont ensuite intégrées une fois pour produire un changement de vitesse croissant et intégrées à nouveau pour produire un changement de position croissant dans le cadre de navigation.



Schéma 89: Une unité de mesure inertielle interne (IMU) et un GPS avec gyroscope laser (insert). (Northrop Grumman)

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les systèmes de navigation intégrés sont utilisés dans les systèmes d'UAV, y compris les missiles de croisière et certains systèmes de missiles balistiques. Parmi les exemples notables, on peut citer les missiles balistiques lancés par sous-marins qui intègrent des unités intégrées de mesure inertielle avec des capteurs stellaires ou des missiles surface-surface qui utilisent des récepteurs GNSS.

**Autres usages:** Les systèmes de navigation intégrés sont utilisés à de nombreuses fins en plus des opérations utilisant des missiles. Ils sont utilisés couramment dans des avions civils et militaires. Ils sont également employés dans des véhicules terrestres qui interviennent en milieux urbains, où ils peuvent être amenés à traiter des pannes de GPS ou des brouillages intentionnels/involontaires de RF. Un système de navigation intégré peut avoir recours à la solution à inertie entre les

quelques mises à jour GNSS disponibles.

Les véhicules télépilotes (RPV) peuvent également bénéficier des systèmes de navigation intégrés. Ils peuvent évoluer dans des conditions dynamiques importantes et être exposés à des brouillages, ce qui pourrait rendre un récepteur satellite de navigation temporairement hors d'usage.

Étant donné qu'un système de navigation intégré fournit une solution d'attitude fiable, les plates-formes aériennes qui exigent une localisation et un angle de pointage précis d'un capteur (par exemple la photogrammétrie, le radar) peuvent disposer de cette capacité en tant qu'élément du système de navigation de la plate-forme ou comme unité séparée.

Les véhicules sous-marins disposant de composants à inertie de type marin peuvent se servir d'un système de navigation intégré en remontant régulièrement à la surface pour permettre des mises à jour du GNSS. Le moment de la mise à jour dépend de la qualité des capteurs à inertie utilisés et de l'exactitude de la solution de navigation recherchée.



Schéma 90: Une centrale inertielle et un GPS. (Honeywell)

**Aspect (sortie d'usine)** Les composants de système intégrés de navigation (par exemple, le récepteur GNSS, les composants à inertie et le matériel d'intégration/de traitement) sont généralement montés dans des boîtiers résistants avec plusieurs connecteurs visibles de l'extérieur. Ces connecteurs fournissent des entrées pour l'alimentation et les antennes et des sorties à un système ou écran de guidage. La dimension linéaire la plus longue du boîtier

est en général de moins de 30 cm. Le récepteur GNSS ou la centrale inertielle peut se trouver en dehors du boîtier du matériel d'intégration/de traitement, en fonction de l'application. Ces composants sous de multiples formes sont illustrés Figure 88, Figure 89, et Figure 90.

**Aspect (à l'emballage):** Les systèmes de navigation intégrés seraient expédiés dans des caisses en métal ou en plastique ou dans des boîtes en carton rembourrées. Le câblage externe et les antennes peuvent être inclus avec une livraison selon la plate-forme prévue.

9.A.8. Les détecteurs de cap magnétiques triaxiaux ayant toutes les caractéristiques suivantes, et les composants spécialement conçus de ceux-ci:

- Compensation interne des écarts de niveau dans les axes de tangage (+/- 90°) et de roulis (+/- 180°).
- Capables d'assurer une précision azimutale meilleure que (inférieure à) 0,5° rms à des latitudes de +/- 80°, rapportés au champ magnétique local; et
- Conçus ou modifiés pour être intégrés dans les systèmes de contrôle des vols et de contrôle de la navigation.

**Note:**

*Les systèmes de contrôle des vols et de contrôle de la navigation visés à l'article 9.A.8. comprennent les stabilisateurs gyroscopiques, pilotes automatiques et systèmes de navigation à inertie*

- Finlande
- Israël
- Suisse
- États-Unis
- France
- Pays-Bas
- Royaume Uni

Production globale



**Nature et But:** Des détecteurs à cap magnétique triaxiaux mesurent le champ magnétique de la Terre dans trois composants orthogonaux. Ce champ indique le pôle sud et le pôle nord magnétique, est vertical (grand angle de «pendage») près des pôles magnétiques et horizontal (petit angle de «pendage») près de l'équateur. Ces capteurs dévient un angle de cap



du composant horizontal du champ magnétique local. Près des pôles, une mesure précise du cap est difficile, car le champ magnétique n'a qu'un petit composant horizontal.

Une fois qu'un cap magnétique est calculé, l'utilisateur ou l'application peut préférer le cap à mettre en référence par rapport au vrai nord plutôt qu'au nord magnétique. Cette correction de déclinaison est calculée en fonction de la position et de l'heure de plusieurs modèles globaux

**Mode de fonctionnement:** Un type courant de sonde magnétique utilisé à des fins de navigation est le capteur magnéto-résistant (MR). Ce capteur se compose de fines bandes de permalloy (couche magnétique NiFe) dont la résistance électrique varie avec le changement de champ magnétique. Ces capteurs ont un axe de sensibilité bien défini et sont produits en série en tant que circuit intégré.

En raison des matériaux ferreux présents dans la structure de véhicule hôte et ses systèmes électriques associés, le champ magnétique mesuré est déformé par rapport au véritable champ magnétique. Les compensations dues aux champs magnétiques produits par les aimants permanents et les composants électriques sont considérés comme du «fer dur» et peuvent être modélisés en tant que polarisations constantes. Ceux qui varient avec l'orientation de la plate-forme sont considérés comme du «fer doux». Si cette dernière peut être physiquement tournée, les erreurs dues au fer dur et doux peuvent être estimées et intégrées dans des tables d'étalonnage. Alternativement, quelques systèmes utilisent un champ magnétique auto-généré et variable pour exécuter cette étape d'étalonnage sur place. Avant l'étalonnage des erreurs, on suppose que les angles de montage des axes du capteur magnétomètre sont connus par rapport aux axes du véhicule.



Schéma 91: Un capteur magnétique de cap autonome de précision. (KVH)



Schéma 92: Ce module gyrostabilisé de boussole magnétique utilise les capteurs magnétiques gyroscopiques de cap à trois axes. (Honeywell)

Semblable aux unités de mesure inertielle strapdown, les mesures de magnétomètre à trois axes sont fixées électroniquement par cardan au cadre horizontal local. Ceci est réalisé après avoir mesuré l'assiette longitudinale et latérale du véhicule à l'aide d'un accéléromètre à trois axes ou d'un système de navigation supplémentaire. L'angle de cap est ensuite résolu à partir des deux composantes horizontales du champ magnétique.

La compensation du gyroscope est aussi parfois utilisée pour permettre une mesure de cap robuste alors que le véhicule hôte est peut-être exposé à des anomalies magnétiques transitoires.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les véhicules aériens sans pilote (UAV) peuvent utiliser la mesure de cap des capteurs magnétiques à des fins de navigation lorsqu'ils volent entre les points de cheminement. Les capteurs magnétiques sont également utilisés dans les télémètres laser, l'alignement des antennes et peuvent également être intégrés aux récepteurs GNSS (Global Navigation Satellite Systems) et aux systèmes de navigation inertielle pour les applications de missiles. Ces capteurs servent de source de mesure supplémentaire pendant la période de mise à jour d'un algorithme de filtre de Kalman. L'estimation du cap peut également être utilisée directement par le système de pilotage automatique d'un système de guidage de missile.



Comme les capteurs magnétiques effectuent une mesure absolue de l'orientation plutôt qu'une mesure intégrée (p. ex. à partir d'un gyroscope), ils ne souffrent pas d'erreurs de dérive de plus en plus importantes dans les systèmes inertiels non corrigés. Pendant les périodes d'interférences RF, qui peuvent empêcher les mises à jour du GNSS, les mesures des capteurs magnétiques restent utiles car elles ne nécessitent pas de mises à jour périodiques.

**Autres usages:** Les capteurs magnétiques ont un certain nombre d'applications en plus de leur utilité dans les systèmes de navigation des missiles. Ils sont utilisés dans les véhicules terrestres pour fournir au conducteur une lecture de boussole en "8 points" (par ex. NW, N, NE, etc.). Étant donné que les véhicules terrestres fonctionnent généralement près de l'horizontale, la compensation de l'inclinaison des mesures du capteur n'est pas indispensable. Si les capteurs magnétiques sont montés de façon permanente dans un emplacement statique, ils peuvent être utilisés pour la détection et la classification des véhicules, car les champs magnétiques détectés varient en raison de la proximité des véhicules et des caractéristiques ferreuses. Les capteurs magnétiques des appareils de navigation personnels (appareils de navigation personnels) peuvent être utilisés pour mettre à jour l'orientation de la carte ou augmenter les caractéristiques de réalité dans des applications mobiles spécifiques lorsque les appareils de navigation personnels sont en rotation.

**Aspect (sortie d'usine)** Les composants de capteurs magnétiques peuvent être montés en triade directement sur un circuit imprimé à l'intérieur d'un système de navigation ou peuvent être séparés des autres composants électroniques dans leur propre boîtier non ferreux. Un boîtier séparé permet de monter les capteurs magnétiques aussi loin que possible des matériaux ferreux dans le véhicule hôte. Les capteurs magnétiques sont de très petite taille, avec des dimensions typiques d'environ 2,5 cm x 2,5 cm x 15 cm. Ils sont également très légers, pesant environ 15 g à 20 g (Figure 92).

**Aspect (à l'emballage):** Les composants des capteurs magnétiques sont expédiés dans de petites boîtes ou caisses et ne sont pas eux-mêmes susceptibles d'être endommagés par les chocs. Cependant, les composants de compensation d'inclinaison (par ex. les accéléromètres) peuvent être affectés par des chocs importants, ce qui nécessite le rembourrage de l'ensemble du système pendant le transport.

**Note:**

*Les équipements ou «logiciels» visés aux articles 9.A. ou 9.D. peuvent être exportés en tant qu'éléments d'un appareil habité, d'un satellite, d'un véhicule terrestre, d'un navire marin/sous-marin ou d'un équipement de levé géophysique ou en quantités appropriées pour remplacer des pièces pour ces applications.*

## 9.B. Équipement d'essai et de production

9.B.1. «Équipement de production» et autre équipement d'essai, d'étalonnage et d'alignement, autre que ceux décrits à l'article 9.B.2, conçu ou modifié pour être utilisé avec l'équipement visé à l'article 9.A.

**Note:**

*L'équipement mentionné dans l'article 9.B.1 comprend ce qui suit:*

a. *Pour les gyrolasers, les équipements suivants utilisés pour caractériser les miroirs, ayant un seuil de précision égal ou supérieur à celui mentionné:*

1. *Diffusiomètre: 10 ppm;*
2. *Réfectomètre: 50 ppm;*
3. *Profilomètre: 5 angströms.*

b. *Pour les autres équipements à inertie:*

1. *Appareil de contrôle de module de centrale inertielle;*
2. *Appareils de contrôle de plate-forme de centrale inertielle;*
3. *Dispositifs stables de manipulation d'éléments de centrale inertielle;*
4. *Dispositif d'équilibrage de plate-forme de centrale inertielle;*
5. *Poste d'essai pour le réglage des gyroscopes;*
6. *Poste d'équilibrage dynamique des gyroscopes;*
7. *Poste pour le rodage et le contrôle des moteurs d'entraînement des gyroscopes;*
8. *Poste de purge et de remplissage des gyroscopes;*
9. *Dispositif de centrifugation pour paliers de gyroscope;*
10. *Poste d'alignement d'axe d'accéléromètre;*
11. *Poste d'essai d'accéléromètre.*
12. *Enrouleuses de bobines de gyroscopes à fibres optiques*

9.B.2. Équipement comme suit:

a. *Machines d'équilibrage présentant toutes les caractéristiques suivantes:*

1. *Ne pouvant pas équilibrer des rotors/ensembles d'une masse supérieure à 3 kg;*
2. *Capables d'équilibrer des rotors/ensembles à des vitesses supérieures à 12 500 tours/min;*
3. *Capables d'effectuer des corrections d'équilibrage selon deux plans ou plus; et*
4. *Capables de réaliser l'équilibrage jusqu'à un balourd résiduel de 0,2 g/mm/kg de masse*

*du rotor;*

b. *Têtes indicatrices (parfois appelées instruments d'équilibrage) conçues ou modifiées pour être utilisées avec les machines visées à l'article 9.B.2.a.;*

c. *Simulateurs de mouvement ou tables rotatives (équipement capable de simuler le mouvement) présentant toutes les caractéristiques suivantes:*

1. *Deux axes ou plus;*
2. *Conçus ou modifiés pour incorporer des bagues collectrices ou des dispositifs sans contact intégrés capables de transmettre un courant électrique ou des informations de signal, ou les deux; et*

3. Ayant l'une des caractéristiques suivantes:
  - a. Pour chaque axe présentant toutes les caractéristiques suivantes:
    1. Pouvant atteindre des taux de 400 degrés ou plus, ou 30 degrés ou moins; et;
    2. Une résolution de taux égale ou inférieure à 6 degrés et une précision égale ou inférieure à 0,6 degré/s;
  - b. Ayant, dans le pire des cas, une stabilité de taux inférieure (meilleure) ou égale à plus ou moins 0,05 %, calculée en moyenne sur 10° ou plus; ou
  - c. Une précision de positionnement égale à ou meilleure que 5 secondes d'arc;
  - d. Tables de positionnement (équipements capables d'effectuer un positionnement rotatif précis dans n'importe quel axe) présentant toutes les caractéristiques suivantes:
    1. Deux axes ou plus;
    2. Une précision de positionnement égale à ou meilleure que 5 secondes d'arc;
  - e. Centrifugeuses capables d'accélération de plus de 100 g et conçues ou modifiées pour comprendre des bagues collectrices ou des dispositifs sans contact intégrés capables de transmettre un courant électrique et des informations de signal.

**Notes:**

1. Les seuls appareils d'équilibrage, têtes indicatrices, simulateurs de mouvement, tables rotatives, tables de positionnement et centrifugeuses répertoriés dans l'article 9 sont ceux visés par l'article 9.B.2.
2. L'article 9.B.2.a. ne vise pas les appareils d'équilibrage conçus ou modifiés pour des équipements dentaires ou autres équipements médicaux.
3. Les articles 9.B.2.c. et 9.B.2.d. ne visent pas les tables rotatives conçues ou modifiées pour des machines-outils ou des équipements médicaux.
4. Les tables rotatives non visées par l'article 9.B.2.c. et ayant les caractéristiques d'une table de positionnement doivent être évaluées en fonction de l'article 9.B.2.d.
5. L'équipement qui présente les caractéristiques indiquées à l'article 9.B.2.d. et qui satisfait aux critères de l'article 9.B.2.c. est traité comme l'équipement visé à l'article 9.B.2.c.
6. L'article 9.B.2.c. ne s'applique que si les bagues collectrices ou les dispositifs sans contact intégrés sont ou non installés au moment de l'exportation.
7. L'article 9.B.2.e. ne s'applique que si les bagues collectrices ou les dispositifs sans contact intégrés sont ou non installés au moment de l'exportation.

**Nature et But:** L'alignement, l'étalonnage et l'équipement d'essai sont utilisés pour construire, étalonner, tester et caractériser ces instruments afin de répondre à leurs exigences. Les gyroscopes, les accéléromètres et les UMI sont des instruments de précision qui doivent être précis et fiables dans le temps. Il est particulièrement important de disposer d'un équipement d'essai qui soumet un instrument à des accélérations et à des changements d'orientation tout en mesurant la réponse de l'instrument dans le temps. Cet équipement est essentiel à la fabrication d'instruments inertiels de haute qualité. Tout équipement d'essai, d'étalonnage, d'alignement et de production spécialement conçu est contrôlé même s'il n'est pas spécifié dans la liste.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cet équipement est nécessaire pour produire et étalonner des instruments inertiels destinés à être utilisés dans les missiles de tous types.

**Autres usages:** La plupart des engins spatiaux, aéronefs et autres véhicules qui utilisent des unités de navigation ou de guidage par inertie nécessitent un équipement et des technologies similaires pour le développement, la production, les essais et l'étalonnage. Toutefois, de nombreuses autres applications non liées aux missiles peuvent utiliser des instruments inertiels avec des taux de dérive plus élevés, des tolérances de vibration et d'accélération plus faibles et des exigences de stabilité plus faibles. Ainsi, les équipements d'essai, d'étalonnage, d'alignement et de production des équipements inertiels non missiles sont souvent moins sophistiqués et moins précis que ceux nécessaires pour des missiles précis.

**Aspect (sortie d'usine):** L'équipement d'alignement, d'étalonnage, d'essai et de production spécialement conçu pour ces éléments de guidage et de navigation décrits au paragraphe 9.A. est habituellement de production limitée. Ils sont aussi divers en taille, en poids et en apparence qu'en fonction, et ces caractéristiques changent au fur et à mesure que la technologie évolue. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une liste exhaustive, nous présentons ci-dessous de brèves descriptions de quelques exemples.

Parce que les gyroscopes à laser en anneau détectent le changement de phase des longueurs d'onde minuscules dans la lumière, leur précision est déterminée par la qualité de leurs miroirs. Les miroirs doivent avoir une forme précise et refléter presque toute la lumière qui leur tombe dessus, sans l'absorber ni la disperser. Les trois équipements suivants sont conçus pour caractériser les miroirs utilisés dans ces gyroscopes.

Un diffusiomètre mesure la tendance d'un miroir à diffuser la lumière loin de la direction prévue avec une précision de 10 ppm ou moins. Il fournit un faisceau d'intensité connue et mesure l'intensité des rayons diffusés.

Un réflectomètre mesure la capacité d'un miroir à réfléchir la lumière avec une précision de mesure de 50 ppm ou moins. Il fonctionne en faisant briller un faisceau d'intensité connue sur le miroir et en mesurant l'intensité de la lumière réfléchie.

Un profilomètre mesure le profil de la surface optique d'un miroir avec une précision de 5 angströms ( $5 \times 10^{-10}$  m) ou moins. Différentes méthodes sont utilisées pour cartographier les minuscules variations de la surface optique. Cette cartographie aide à déterminer les écarts localisés par rapport à la géométrie théorique parfaite, qu'elle soit conçue pour être plate, concave ou convexe.

La précision des systèmes de guidage inertiels est déterminée par la qualité de leurs accéléromètres et gyroscopes. La plupart des équipements suivants caractérisent ou testent ces instruments lorsqu'ils fonctionnent séparément, en tant qu'ensemble ou en tant qu'UMI complète.

Un testeur de module IMU fait fonctionner électriquement un module IMU, simule les entrées et collecte les données de réponse pour confirmer le bon fonctionnement électrique. Un testeur de plate-forme UMI exploite une plate-forme UMI complète, c'est-à-dire l'élément stable ou l'UMI strapdown pleinement opérationnel. Une table de fréquence triaxiale, également appelée simulateur de mouvement, est souvent utilisée dans le cadre d'un testeur de plate-forme IMU.

Ces tableaux sont contrôlés sous la rubrique 9.B.2.c. Une UMI testée par cet équipement devrait détecter correctement la gravité et la rotation de la terre à travers tous les changements d'orientation sans qu'il soit mal interprété comme un mouvement latéral ou vertical et sans perdre de vue son alignement initial par rapport à un repère de coordonnées fixe.

Un dispositif de manipulation d'éléments stables de l'UMI manipule en toute sécurité l'élément stable de l'UMI, c'est-à-dire la partie intérieure d'une UMI à cardan ou flottante, qui contient les instruments inertiels. Une manipulation soignée facilite les nombreuses manœuvres nécessaires sans dégrader l'élément stable lors du montage, du test et du réglage.



**Schéma 93: Une table d'évaluation classique utilisée pour accorder des gyroscopes (Ideal Aerosmith, Inc)**

Un dispositif d'équilibrage de plate-forme IMU détermine le déséquilibre de la plate-forme IMU et facilite ainsi les ajustements pour établir l'équilibre. Le centre d'équilibre doit être établi avec précision pour éviter les couples en accélération et les vibrations en vol.

Une station d'essai d'accordage de gyroscope active l'équipement à la tension désirée à une série de vitesses pour déterminer la meilleure fréquence de fonctionnement de la rotation ou les t/min. Le meilleur t/min est atteint quand les effets des sources d'erreur du gyroscope sont réduits au minimum, comme indiqué par des données collectées. Une table classique de fréquences utilisée en tant qu'élément d'une station d'essai d'accordage de gyroscope est montrée sur les Figure 93 et Figure 94.

Une station d'équilibrage dynamique gyroscopique équilibre avec précision les éléments rotatifs à grande vitesse des gyroscopes de masse en rotation. L'équilibre est essentiel à la performance et à la longévité du gyroscope. Ces machines d'équilibrage sont soumises au contrôle prévu à l'article 9.B.2.a. s'ils présentent les caractéristiques de performance spécifiées.

Une station d'essai de rodage du gyroscope/moteur alimente le gyroscope ou le moteur gyroscopique à la tension et à la fréquence désirées pour accumuler le temps de fonctionnement et ainsi percer les roulements et mesurer le rendement du moteur au régime nominal de rotation.

Une station d'essai d'évacuation et de remplissage de gyroscope purge une cavité interne de gyroscope et la remplit avec la pression nominale d'un liquide ou d'un mélange de gaz souhaité. La plupart des gyroscopes et accéléromètres seront remplis d'un gaz sec inerte pour améliorer leur performance à long terme. De plus, certains gyroscopes ont des cavités internes qui nécessitent soit un liquide spécifique d'une densité et d'une viscosité données, soit un mélange spécifique de gaz pour fonctionner correctement.

Un support de centrifugation pour les roulements de gyroscopes facilite les essais des gyroscopes dans une centrifugeuse afin de confirmer la capacité des roulements à résister aux forces d'accélération prévues pendant le vol. Les dispositifs de centrifugation sont également utilisés pour éliminer l'excès de lubrifiant des bagues de retenue des roulements d'un gyroscope.

Une station d'alignement d'axe d'accéléromètre contrôle son alignement en tournant l'accéléromètre autour de son axe d'entrée alors que ce dernier est horizontal. Cet essai est souvent répété après des essais de vibration ou des cycles de température pour déterminer les stabilités d'alignement de l'axe d'entrée. L'alignement de l'axe d'entrée de l'accéléromètre est de nouveau vérifié après l'installation au niveau de l'UMI pour déterminer les écarts légers mais importants par rapport à la perpendicularité mutuelle souhaitée de l'axe d'entrée.

Les stations de test d'accéléromètre sont utilisées pour tester la précision avec laquelle un accéléromètre peut mesurer la gravité sur une gamme de positions et d'angles. Ces données sont ensuite utilisées pour étalonner l'instrument. Les accéléromètres sont montés sur une surface de table verticale et basculés pour subir une accélération gravitationnelle en position verticale et alternativement la tête en bas. Les stations d'essai d'accéléromètre peuvent effectuer des essais qui comprennent le contrôle de la température à l'aide d'appareils d'enregistrement de données qui enregistrent les données sur une longue période de temps.

Les enrouleuses de bobines de gyroscopes à fibre optique sont utilisées pour enrouler la bobine de fibre optique au cœur des gyroscopes à fibre optique (Fiber Optic Gyroscopes - FOG). Les fibres optiques FOG sont généralement enroulées selon un procédé complexe connu sous le nom d'enroulement quadripolaire tout en mettant en place des contrôles stricts pour assurer une tension optimale des fibres, éviter la torsion des fibres, obtenir un contact superficiel positif et éliminer les espaces avec perte de courbure des fibres qui en résulte. Ce processus minutieux d'enroulement d'une fibre optique délicate sur la bobine est une étape critique dans la fabrication d'un FOG de haute qualité.



**Schéma 94: Une station de test de gyroscope biaxial utilisant un simulateur de mouvement/table de variations (Contraves, Inc)**

Les machines d'équilibrage sont principalement utilisées pour équilibrer les gyroscopes de masse en rotation avec un haut niveau de précision. Les machines d'équilibrage sont contrôlées au point 9.B.2.a.

Les têtes indicatrices sont des tables rondes en acier de précision qui peuvent être tournées et verrouillées dans une direction spécifique à plusieurs reprises sans perte de précision. Elles sont également connues sous le nom de testeurs de culbuteurs, têtes d'indexage, tables de positionnement et têtes de division.

Les têtes indicatrices modifiées pour l'utilisation dans les machines d'équilibrage énumérées à l'article 9.B.2.a. sont visés au point 9.B.2.b. et les têtes indicatrices multiaxes

de haute précision (c'est-à-dire les tables de positionnement) sont visées au point 9.B.2.d.

Les simulateurs de mouvements contrôlés et les tables de fréquence sont des machines de précision qui font tourner une table de montage autour de plusieurs axes à des vitesses et angles connus avec précision. Ils sont normalement utilisés dans le développement du guidage pour tester les instruments et les assemblages d'UMI comme décrit ci-dessus. La Figure 95 montre un simulateur de mouvement gyroscopique à deux axes et à intégration de vitesse. Ces tables de fréquence sont contrôlées au point 9.B.2.c.



**Schéma 95: un système de profilomètre utilisé pour la mesure des miroirs. (Instruments numériques) Au milieu à gauche: autre appareil de contrôle portatif de centrale inertielle relié à une centrale inertielle miniature (Litton Guidance and Control Systems) Au milieu à droite: table triaxiale de test pour centrales inertielles ou gyroscopes**



Une centrifugeuse est utilisée en tant qu'élément d'une station d'essai d'accéléromètre afin de déterminer les non-linéarités de l'accéléromètre par rapport à une portée sensiblement au-dessus du plus et moins une g appliquées dans des essais de chute. Les centrifugeuses sont contrôlées au point 9.B.2.e.

**Aspect (à l'emballage):** L'emballage varie considérablement selon la taille, le poids et la sensibilité de l'équipement spécifique. Cependant, comme la plupart de ces articles sont des équipements de précision sensibles aux chocs ou à la rouille, l'emballage est susceptible d'être robuste, avec un rembourrage et des revêtements pour protéger contre les chocs et l'humidité. Une grande partie de l'équipement peut être démontée et expédiée dans des conteneurs ou des caisses séparés.

## 9.C. Matériaux

Aucun.

## 9.D. Logiciel

9.D.1. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié pour «l'utilisation» de l'équipement spécifié dans les articles 9.A., ou 9.B.

- Autriche
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Pakistan
- Afrique du Sud
- Suède
- Ukraine
- États-Unis
- Canada
- France
- Inde
- Italie
- Norvège
- Fédération de Russie
- Espagne
- Suisse
- Royaume Uni

Production globale



**Nature et But:** Les systèmes d'instruments de vol intégrés utilisent un logiciel pour interpréter et traduire l'information recueillie à l'extérieur de la cellule d'avion pour en faire de la reconnaissance, du guidage ou de la recherche de cible. Les compas gyro-astrosopiques, les gyroscopes à laser en anneau et les instruments inertiels sensibles utilisés dans d'autres applications peuvent être installés et utilisés dans les systèmes de navigation des systèmes de missiles comme capteurs couplés à un ordinateur de vol pour déterminer avec une grande précision l'accélération, la vitesse et la position. Chacun de ces systèmes nécessite un logiciel spécialisé qui intègre la sortie du capteur et compense les signaux d'erreur, comme la dérive.

Le logiciel de guidage des bornes intègre les données de sortie de nombreux capteurs pour guider l'arme libérée vers sa cible. Des accéléromètres particulièrement robustes sont utilisés dans les véhicules de rentrée pour déterminer l'ampleur de la décélération rapide. L'arme peut être activée ou activée lorsque la valeur de décélération est à une valeur prédéterminée.

Le logiciel installé sur l'ordinateur de vol d'un UAV est utilisé pour lancer et le faire voler vers sa cible et activer la charge utile (caméra, arme, etc.) une fois au-dessus de la cible. Les systèmes de guidage inertiel des UAV peuvent être complétés par des systèmes supplémentaires qui utilisent des signaux radio au sol, des signaux GNSS ou des ensembles astrogyroscope qui identifient les points de référence célestes.

D'autres types de logiciels sont utilisés pour tester, calibrer et aligner les systèmes de guidage. Les composants du système de guidage sont placés sur des stations d'essai et sont soumis à une variété d'essais conçus pour mesurer des caractéristiques telles que la dérive et les facteurs d'échelle. Des instruments apparemment identiques auront des caractéristiques qui varient d'une unité à l'autre. Chaque dispositif doit être caractérisé. Les données recueillies par ces essais sont ajoutées au programme de vol comme facteur de correction pour cet instrument.

**Mode de fonctionnement:** Le système d'instruments de vol intégré forme une série de systèmes de navigation redondants qui permettent une navigation très précise. Un compas gyro-astroscopique installé dans un UAV ou un système de fusée utilise un logiciel de navigation pour déterminer (à la réception d'un ou plusieurs "verrouillages en étoile") sa vitesse, sa position et son cap. Les systèmes de navigation automatisés peuvent utiliser ce concept pour suivre des trajectoires de vol préprogrammées jusqu'à sa zone cible. Les gyroscopes sont utilisés pour maintenir l'orientation de la plate-forme inertielle dans l'espace pendant que la fusée ou le système de véhicule sans pilote est au sol et en vol motorisé. Les sous-programmes du logiciel de vol contiennent des facteurs de correction tels que les données de vitesse de dérive. L'ordinateur de bord traite ces informations et délivre des signaux de correction aux moteurs coupleurs montés dans les cardans de la plate-forme. Ces moteurs maintiennent la plate-forme dans une orientation stable tout au long du vol. Les informations provenant des accéléromètres montés sur la plate-forme stable sont envoyées à l'ordinateur de vol sous forme de données d'accélération. Le logiciel de vol recueille ces données et, après avoir incorporé d'autres données du système d'instruments de vol intégré, émet des signaux de direction et de commande pour diriger la cellule vers la cible.

Des versions spéciales du logiciel de vol intègrent les signaux de sortie de capteurs de navigation supplémentaires pour mettre à jour ou augmenter les données de guidage inertiel. Les boussoles gyro-astroscopiques envoient les données de position des étoiles ou des satellites à l'ordinateur de vol. Le logiciel de l'ordinateur de vol peut utiliser ces données pour mettre à jour les informations de position ou augmenter les données d'accélération détectées par inertie. Les gyroscopes laser en anneau fournissent des informations très précises sur le désalignement de la plate-forme qui peuvent être utilisées pour maintenir une orientation stable de la plate-forme pendant un certain nombre de manœuvres en vol et d'accélération de vol.

Les stations d'essai et d'étalonnage sont utilisées pour mesurer les défauts du système de guidage, comme la dérive des gyroscopes, et fournissent les données de caractérisation utilisées dans le programme de vol pour compenser ces imperfections. Les stations d'alignement confirment la qualité et la pertinence de l'installation et de l'étalonnage des instruments inertiels sur la plate-forme stable. Ces procédures prennent le plus long temps de développement et entraînent le coût le plus élevé pour chaque instrument. Les instruments identiques fabriqués sur un équipement commun nécessitent des essais et un étalonnage détaillés pour déterminer avec précision les caractéristiques individuelles.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le type de logiciel visé à l'article 9.D.1. est utilisé pour assurer une navigation très précise des systèmes d'UAV et de fusée. Des équipements d'usinage automatisés sont nécessaires pour produire les composants de précision qui constituent les instruments de guidage inertiel. Une fois ces composants assemblés, ils sont testés et leur performance est évaluée sur des postes de test informatisés. Les résultats de ces essais produisent des données qui servent à la fois à caractériser l'instrument, comme la vitesse de dérive et le facteur d'échelle, et à définir les constantes du système de guidage dans le logiciel de vol.

**Autres usages:** Des éléments de systèmes d'instruments de vol intégrés (radar, systèmes laser et équipement de radiogoniométrie) sont tous utilisés dans les appareils civils et militaires pour renforcer les systèmes de navigation inertielle. Des composants de navigation inertielle de moindre qualité peuvent être utilisés dans les applications de mesure pendant le forage. Les logiciels utilisés pour tester, étalonner et aligner ces instruments se trouvent dans les installations d'essai et de réparation des avions civils et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

#### 9.D.2. Intégration du «logiciel» pour l'équipement mentionné dans l'article 9.A.1.

- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Pakistan
- Afrique du Sud
- Suède
- Ukraine
- États-Unis
- France
- Inde
- Italie
- Norvège
- Fédération de Russie
- Espagne
- Suisse
- Royaume Uni

Production



**Nature et But:** Le logiciel d'intégration de systèmes de fusée ou d'UAV pour les équipements visés au paragraphe 9.A.1. est utilisé pour coupler la sortie d'un gyrostabilisateur, d'un pilote automatique ou d'autres instruments de vol intégrés à l'ordinateur de vol. L'ordinateur de vol intègre ensuite les informations provenant de ces appareils de navigation auxiliaires aux données fournies par les instruments montés dans le système de navigation inertielle. Le résultat est un guidage précis et des commandes de direction utilisant des instruments de navigation moins coûteux.

**Mode de fonctionnement:** Le logiciel de navigation du système de fusée ou d'UAV stocké dans l'ordinateur de vol accepte les informations provenant du système d'instruments de vol intégré. Cette information de position est évaluée par rapport à la trajectoire prévue, et l'ordinateur de vol transmet au système de contrôle de vol des commandes de correction ou de direction.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ce logiciel est utilisé pour la navigation des UAV et des systèmes de fusées.

**Autres usages:** Ce logiciel peut également être utilisé dans les systèmes de guidage civils et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

### 9.D.3. Intégration du «logiciel» spécialement conçus pour l'équipement mentionné par l'article 9.A.6

- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Pakistan
- Afrique du Sud
- Suède
- Ukraine
- États-Unis
- France
- Inde
- Italie
- Norvège
- Fédération de Russie
- Espagne
- Suisse
- Royaume Uni

Production globale



**Nature et But:** Les logiciels d'intégration spécialement conçus pour l'équipement ou les systèmes visés à l'alinéa 9.A.6. servent à intégrer des gyroscopes, des accéléromètres et des plates-formes inertielles ou stables qui sont utilisés dans des applications autres que de guidage (telles que les antennes de poursuite par satellite, les caméras vidéo, etc.) dans des applications de guidage et de contrôle pour véhicules aériens sans pilote ou systèmes fusée.

**Mode de fonctionnement:** Les instruments de guidage inertiel de meilleure qualité tels que les gyroscopes, les accéléromètres et les plates-formes suffisamment robustes et stables utilisés pour stabiliser les plates-formes de caméra, les mécanismes de forage de guidage, etc. peuvent être utilisés comme composants de systèmes de guidage de fusées centrales et d'UAV avec l'application de logiciels d'intégration appropriés. Ce logiciel est similaire au logiciel de l'unité de mesure inertielle conçu pour

des applications spécifiques de guidage de véhicule en vol. Il est écrit et testé en utilisant le même équipement d'essai et d'étalonnage que celui utilisé pour le matériel plus spécialisé du système de guidage.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ce logiciel est utilisé uniquement pour la navigation des UAV et des systèmes de fusées.

**Autres usages:** Des éléments de systèmes d'instruments de vol intégrés (radar, systèmes laser et équipement de radiogoniométrie) sont tous utilisés dans les appareils civils et militaires pour renforcer les systèmes de navigation inertielle. Les logiciels utilisés pour tester, étalonner et aligner ces instruments se trouvent dans les installations d'essai et de réparation des avions civils et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage

et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

9.D.4. Intégration du «logiciel» conçu ou modifié pour les «systèmes de navigation intégrés» mentionnés à l'article 9.A.7.

**Note:**

*Une forme courante de «logiciel» d'intégration utilise le filtrage Kalman.*

**Nature et But:** Le logiciel d'intégration, conçu ou modifié pour les systèmes de navigation intégrés mentionnés à l'article 9.A.7., intègre les sorties des instruments de mesure inertielle et autres capteurs externes dans un système qui fournit les informations utilisées par le calculateur de vol pour calculer en continu les informations d'altitude, position et vitesse. Le filtrage de Kalman est une procédure logicielle qui estime la position et la vitesse d'un véhicule dans le temps en fonction des performances connues du véhicule en vol, puis met à jour périodiquement cette estimation en utilisant les informations filtrées fournies par d'autres composants du système de guidage. Le filtre utilisé dans les systèmes de navigation en vol des systèmes de fusée ou d'UAV évalue les signaux d'information de position pour éliminer les mesures aléatoires ou erronées (bruit) des autres instruments du système de navigation intégré.

**Mode de fonctionnement:** Le logiciel du système de fusée ou de vol d'un véhicule sans pilote peut être écrit ou modifié de manière à incorporer ce logiciel d'intégration. Il est d'abord testé à l'aide du même équipement de test et de calibration utilisé pour le matériel plus spécialisé de système guidage et mis à l'épreuve par une série de tests en vol.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ce logiciel est utilisé pour la navigation très précise des UAV et des systèmes de fusées.

**Autres usages:** Ce logiciel peut également être utilisé dans les systèmes de guidage civils et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

**Note:**

Les équipements ou «logiciels» visés aux articles 9.A. ou 9.D. peuvent être exportés en tant qu'éléments d'un appareil habité, d'un satellite, d'un véhicule terrestre, d'un navire marin/sous-marin ou d'un équipement de levé géophysique ou en quantités appropriées pour remplacer des pièces pour ces applications.

**9.E. Technologie**

9.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de «logiciels» mentionnés aux articles 9.A., 9.B. or 9.D.

**Note:**

Les équipements ou «logiciels» visés aux articles 9.A. ou 9.D. peuvent être exportés en tant qu'éléments d'un appareil habité, d'un satellite, d'un véhicule terrestre, d'un navire marin/sous-marin ou d'un équipement de levé géophysique ou en quantités appropriées pour remplacer des pièces pour ces applications.

- |               |                       |
|---------------|-----------------------|
| •Argentine    | •Australie            |
| •Brésil       | •Chine                |
| •Danemark     | •France               |
| •Allemagne    | •Inde                 |
| •Israël       | •Italie               |
| •Japon        | •Fédération de Russie |
| •Corée du Sud | •Suède                |
| •Suisse       | •Ukraine              |
| •Royaume Uni  | •États-Unis           |

Production  
globale



**Nature et But:** La technologie de guidage du système de fusée ou d'UAV permet de résoudre des problèmes de contrôle dynamique très complexes. Les ingénieurs de missiles et de guidage doivent connaître tous les aspects physiques des dispositifs utilisés pour assurer une navigation précise. Ces connaissances sont habituellement acquises au moyen d'une série d'exercices de modélisation informatique, d'essais au banc et d'essais en vol. L'intégration de divers outils de navigation tels qu'un pilote automatique, des plates-formes gyrostabilisées et d'autres composants actifs tels que radar, laser ou récepteur GPS est une tâche complexe. Le développement d'équipements de test et de production pour soutenir cette activité représente également un défi. Le concepteur doit connaître le plus précisément possible les caractéristiques des dispositifs qui seront testés et interconnectés sur le banc d'essai afin de

développer les logiciels de simulation requis. Les directeurs de production peuvent concevoir et construire des équipements de production et d'intégration de systèmes de guidage sur la base des conceptions finales déterminées dans les laboratoires. Une grande partie de la technologie nécessaire pour accomplir ces tâches ne peut être obtenue qu'avec l'expérience.



**Mode de fonctionnement:** Au début d'un programme de développement, la technologie d'intégration de la conception se manifeste souvent dans un programme informatique qui modélise la cellule et les systèmes de propulsion, de guidage et de contrôle du véhicule. Le logiciel simule le comportement du système de guidage dans tous les régimes de vol attendus et prévoit la performance théorique. Le concepteur peut modifier les paramètres du sous-système, réexécuter la simulation et choisir les paramètres qui donnent les meilleures performances. Plus tard dans le programme de développement, des simulations "matériel-dans-la-boucle" peuvent être utilisées lorsque des composants et sous-systèmes de guidage réels sont connectés ensemble sur un banc d'essai. L'ordinateur simule l'environnement de vol et tout matériel manquant dans la simulation.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cette technologie est utilisée pour fournir et améliorer les performances et la précision des systèmes de guidage des systèmes de fusée et de véhicules sans pilote. Les exigences relatives à la conception, au développement, à la production et à l'utilisation d'équipements et de logiciels d'essai et de vérification au sol sont tout aussi importantes.

**Autres usages:** Cette technologie peut également être employée pour fabriquer des composants utilisés pour diriger précisément les antennes paraboliques, stabiliser les appareils-photo visuels pour la photographie à longue portée (y compris l'instrumentation de portée de test de missile balistique) et servir d'autres buts civils et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

## Catégorie II - Article 10: Commande de vol

## Article 10 - Commande de vol

## 10.A. Équipement, assemblages et composants

10.A.1. Systèmes de commande de vol pneumatiques, hydrauliques, mécaniques, électro-optiques, ou électromécaniques (y compris commandes de vol électriques et à fibres optiques) conçus ou modifiés pour les systèmes visés à l'article 1.A.

- Australie
- Belgique
- Canada
- République Tchèque
- France
- Grèce
- Inde
- Italie
- Norvège
- Roumanie
- Afrique du sud
- Suède
- Turquie
- États-Unis
- Autriche
- Brésil
- Chine
- Égypte
- Allemagne
- Hongrie
- Israël
- Japon
- Portugal
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Suisse
- Royaume Uni

Production  
globale



**Nature et But:** Le système de commandes de vol fournit et contrôle les mécanismes de direction nécessaires à un système de fusée ou d'UAV pour obtenir un vol stable et exécuter les manœuvres qui en découlent sans perdre de stabilité. Il reçoit normalement les commandes de direction de l'ensemble de guidage, de l'ordinateur de mission ou du système d'instruments de vol intégré.

Le système de commandes de vol comprend des actionneurs pour déplacer les gouvernes, viser les tuyères, contrôler les flux et activer les propulseurs. Il comprend également des capteurs pour détecter les changements d'attitude, le taux de changement d'attitude, la vitesse, l'altitude, le réglage des gaz, la température de l'air et la pression atmosphérique. Ces sorties de capteurs sont souvent partagées par d'autres mécanismes de la fusée ou de l'UAV. Le système de commandes de vol est réparti dans toute la fusée ou l'UAV et se chevauche parfois avec des parties d'autres systèmes.

L'information transmise des sondes à l'ordinateur de commande de vol et aux déclencheurs est analogique ou

numérique et peut être conduite par les fils électriques (pilotage par fil). Les systèmes à la pointe de la technologie peuvent employer des fibres optiques (pilotage-par-lumière) pour fournir la communication numérique entre les composants de commande de vol. Les raccordements optiques sont plus légers et réduisent considérablement la susceptibilité aux effets de l'impulsion électromagnétique, de l'interférence électromagnétique, et de la foudre.

**Mode de fonctionnement:** Lorsque les systèmes de véhicules aériens sans pilote, y compris les missiles de croisière, doivent manœuvrer (virage, montée, etc.), le système d'instruments de vol intégré commande un changement de cap ou d'altitude. Le système des commandes de vol ajuste les déclencheurs pour les gouvernes afin d'introduire le tangage, le roulis et/ou le lacet; il maintient ces réglages jusqu'à ce que l'orientation ait changé; puis il réinitialise les déclencheurs pour maintenir le nouveau profil. Les systèmes de commandes de vol fonctionnent souvent en conjonction avec un gyrostabilisateur ou un pilote automatique, qui détermine les mouvements des gouvernes nécessaires pour effectuer les manœuvres souhaitées. Les pilotes automatiques compensent également en permanence les perturbations de l'environnement.

Les systèmes de fusée peuvent également utiliser des systèmes de commandes de vol qui fonctionnent de la même façon, mais les fusées utilisent le contrôle vectoriel de poussée et parfois de petits jets de direction pour changer de direction. Certains systèmes de fusées utilisent également des ailerons aérodynamiques lorsqu'ils sont dans l'atmosphère.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les systèmes de commandes de vol sont nécessaires pour obtenir un vol stable et exécuter des manœuvres sans perdre de stabilité. Ces systèmes sont généralement adaptés aux caractéristiques de vol et au profil de mission du système de fusée ou d'UAV et ont donc tendance à être spécifiques au système. La plupart des fusées et des UAV utilisent ces systèmes.

**Autres usages:** Les composants utilisés dans les systèmes de commande de vol des missiles peuvent également être utilisés dans les avions militaires et civils.

**Aspect (sortie d'usine)** Le système de commandes de vol n'est pas une seule unité intégrée; il est réparti dans l'ensemble du missile. Les parties du système de commandes de vol les plus susceptibles d'être rencontrées comprennent les actionneurs, les ensembles électroniques, les câbles spécialisés et certains capteurs.

**Aspect (à l'emballage):** Les gouvernes aérodynamiques et les déclencheurs sont des pièces d'équipement assez robustes. L'emballage typique comprend des caisses en bois et des boîtes en carton ou en bois. Elles sont solidement attachées au conteneur d'expédition pour éviter tout mouvement et probablement emballées dans de la mousse de la même forme que les pièces. Les capteurs utilisés dans les systèmes de commandes de vol sont souvent plus délicats et sont normalement emballés individuellement et fixés dans une boîte ou une caisse résistantes aux chocs. Ils sont souvent emballés dans un sac résistant à l'humidité.

#### 10.A.2. Équipement de stabilisation d'orientation conçu ou modifié pour les systèmes visés à l'article 1.A.

- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Royaume Uni
- France
- Inde
- Italie
- Fédération de
- États Unis

Production globale



**Nature et But:** Le contrôle de l'attitude est différent du guidage. Le guidage est centré sur l'assurance qu'un véhicule atteint une position prédéterminée à un moment donné. Le contrôle d'attitude permet de s'assurer que la cellule d'avion a une certaine orientation dans l'espace à des moments donnés. Il existe trois méthodes fondamentales pour contrôler l'assiette d'un véhicule volant: l'utilisation des forces aérodynamiques (ailes), la déviation de la poussée du moteur-fusée principal et l'utilisation de dispositifs auxiliaires produisant une poussée.

**Mode de fonctionnement:** Les actionneurs utilisés pour déplacer les gouvernes aérodynamiques d'un UAV peuvent être rotatifs ou linéaires. Un déclencheur rotatif peut être alimenté par un moteur électrique et répond proportionnellement à une commande d'entrée.

Le déclencheur fait partie d'un système de commande en circuit fermé, qui comprend un amplificateur et une méthode pour détecter la position du déclencheur. La sortie mécanique du déclencheur est soit un moyeu pouvant recevoir un arbre de surface de commande, soit un arbre sur lequel une gouverne peut être montée. Un déclencheur pour la commande du vecteur poussée (TVC) utilisé sur les fusées, y compris les lanceurs spatiaux, est illustré à la Figure 96. Un actionneur linéaire utilisé pour contrôler le pas des pales de rotor sur les UAV est illustré à

la Figure 97. Parfois, un déclencheur ne doit pas seulement être capable de faire tourner la gouverne en une force aérodynamique importante mais doit aussi supporter l'ensemble de la masse de la surface lors des lancements et manœuvres à haute accélération. Les actionneurs linéaires sont reliés aux gouvernes par des liaisons mécaniques qui convertissent le mouvement de l'actionneur linéaire en un mouvement angulaire de la gouverne. Ces déclencheurs sont alimentés par un moteur électrique, un gaz sous pression ou un fluide hydraulique.



**Schéma 97:** Un système de contrôle électromécanique de vecteur de poussée, avec le déclencheur linéaire et la boîte Électronique associée, utilisés sur des fusées, y compris des lanceurs spatiaux (Moog, Inc)



**Schéma 96:** Un déclencheur linéaire utilisé pour placer le lancement des lames de rotor sur un véhicule aérien sans pilote de rotor d'inclinaison et conçu pour fonctionner dans des conditions environnementales et de résistance extrêmes (Moog, Inc)

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les dérives et les gouvernails du système d'UAV sont utilisés pour corriger les inexactitudes dans la trajectoire de vol qui sont détectées par le système de guidage ou pour déclencher des commandes de direction vers un nouveau cap ou une nouvelle altitude de route. Les dispositifs de commande du vecteur poussée du système de fusée sont utilisés aux mêmes fins.

**Autres usages:** Les composants utilisés dans les systèmes de commande de vol des fusées et UAV peuvent également être utilisés dans les avions militaires et civils.

**Aspect (sortie d'usine):** Les composants du système de commandes de vol sont répartis dans l'ensemble du missile. Les capteurs, amplificateurs et autres composants sont logés dans des boîtiers scellés. Les actionneurs sont situés au même endroit ou sont fabriqués intégralement avec une gouverne de vol. Les déclencheurs utilisés pour déplacer les gouvernes aérodynamiques d'un UAV, y compris pour les missiles de croisière, peuvent être soit rotatifs, soit linéaires.

**Aspect (à l'emballage):** Les gouvernes aérodynamiques et les déclencheurs sont des pièces d'équipement assez robustes. L'emballage typique comprend des caisses en bois et des boîtes en carton ou en bois. Elles sont solidement attachées au conteneur d'expédition pour éviter tout mouvement et probablement emballées dans de la mousse de la même forme que les pièces. Les capteurs utilisés dans les systèmes de commandes de vol sont souvent plus délicats et sont normalement emballés individuellement et fixés dans une boîte ou une caisse résistantes aux chocs. Ils sont souvent emballés dans un sac résistant à l'humidité.



**Schéma 98:** Un déclencheur électromécanique de commande de vol pour un aileron de queue d'un petit missile (Daimler Benz Aerospace)

10.A.3. Servovalves de contrôle du vol conçues ou modifiées pour les systèmes visés aux articles 10.A.1. ou 10.A.2, et conçues ou modifiées pour fonctionner dans des ambiances vibratoires de plus de 10 g efficaces (valeur efficace) entre 20 Hz et 2 kHz.

**Note:**

*Les systèmes, l'équipement ou les valves visés par l'article 10.A. peuvent être exportés s'ils font partie d'un appareil piloté ou d'un satellite ou s'ils sont livrés en quantités appropriées au remplacement de pièces d'appareils pilotés*

- Chine
- Israël
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis
- France
- Japon

Production globale



**Nature et But:** Une servovalve est une vanne à commande électrique qui utilise la rétroaction pour contrôler avec précision la position d'un dispositif interne (soit une tuyère à clapet, soit un tuyau à jet) pour contrôler le débit du fluide. Le terme servovalve électrohydraulique est souvent utilisé parce que les servovalves sont commandées par un signal électrique et sont habituellement utilisées dans les systèmes hydrauliques. Les servovalves fonctionnent avec une très grande précision, une très grande répétabilité, une très faible hystérésis et une très haute réponse en fréquence. Les systèmes de servovalves présentent des caractéristiques de réponse élevées, une grande fiabilité, un contrôle de position précis, un contrôle de vitesse et un contrôle de force.

Les servovalves sont utilisées lorsqu'un contrôle de position précis est requis, comme le contrôle d'une gouverne de vol principale. Le contrôle de position est réalisé par un système de contrôle en circuit fermé, composé d'un capteur de commande, d'un capteur de retour, d'un contrôleur numérique ou analogique et d'une servovalve. Les servovalves peuvent être utilisées pour commander des déclencheurs hydrauliques ou des moteurs hydrauliques. Une combinaison d'une servovalve et d'un servomoteur est appelée servomoteur. Le principal avantage d'une servovalve est de pouvoir utiliser un signal électrique de faible puissance pour positionner avec précision un actionneur ou un moteur.

**Mode de fonctionnement:** Les composants principaux d'une servovalve sont un moteur-couple, une tuyère à clapets ou un tube à jet et une ou plusieurs bobines (servo). Les servomoteurs des servovalves aérospatiales sont généralement dépourvus de rodage, ce qui signifie que la largeur du tour et la largeur de l'orifice d'écoulement sont égales. Ainsi, il n'y a qu'une seule position pour le débit nul. Cette configuration permet généralement d'obtenir le contrôle le plus serré et est couramment choisie pour les servovalves de haute précision.

La servovalve est équipée d'une entrée de pression hydraulique et d'une entrée électrique pour le moteur couple. Le courant d'entrée contrôle la position du clapet. La position des clapets contrôle la pression dans les chambres du déclencheur. Ainsi, un courant (+ ou -) positionnera le clapet, ce qui entraînera une différence de pression sur le servo, ce qui le déplacera dans une direction ou dans l'autre.

Le mouvement des orifices des servocommandes porte la pression hydraulique d'un côté de l'actionneur ou de l'autre, tout en orientant le côté opposé de l'actionneur vers le retour.

La plupart des servodistributeurs sont dotés d'un ressort de rappel entre le tiroir pilote et le clapet. Si le clapet se déplace vers la gauche, la différence de pression sur la bobine pilote la déplace vers la droite. Le retour tirera alors



le clapet vers la position neutre. Par conséquent, le fil de retour fournit une force stabilisatrice au clapet et aide à améliorer la stabilité et la réponse du système de clapet. La position du servomoteur est déterminée par l'équilibre des forces sur le tiroir, qui comprend la différence de pression créée par la tuyère du clapet, les forces de friction, les forces du ressort et les forces de flux agissant sur la bobine.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La commande du vecteur poussée (VCT) est utilisée lorsque les surfaces aérodynamiques sont inadéquates pour contrôler le missile ou lorsqu'une plus grande agilité du missile peut être requise. Le sous-système TVC est utilisé pour le cardan de l'ensemble du moteur-fusée (typique des moteurs à propergol liquide) ou pour le cardan de la tuyère de la fusée (typique des moteurs à propergol solide) ou pour déplacer les aubes de projection dans la partie tuyère de la chambre de poussée pour assurer la direction précise du missile. Le mouvement du cardan ou de la pale du jet est réalisé par des déclencheurs. Les mouvements des déclencheurs hydrauliques sont commandés par des servovalves qui, à leur tour, sont commandées par des commandes provenant du système de guidage du véhicule.

**Autres usages:** Les servovalves sont utilisées dans un large éventail d'applications industrielles modernes en raison de leur capacité à supporter des charges d'inertie et de couple élevées tout en obtenant des réponses rapides et un degré élevé de précision et de performance. Les applications typiques comprennent les systèmes de suspension active, la commande de robots industriels et le traitement du plastique. Elles sont également omniprésentes dans les avions commerciaux, les satellites, les lanceurs, les simulateurs de vol, le contrôle des turbines et de nombreuses applications militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** Les servovalves utilisées dans les systèmes de commandes de vol peuvent être fabriquées en acier inoxydable et être munies de pivots de montage aux deux extrémités. Les raccords hydrauliques et électriques se trouvent sur le côté de l'appareil. Les indicateurs de position fournissent des signaux de retour à l'ordinateur de vol et peuvent être disponibles via un connecteur électrique séparé.

**Aspect (à l'emballage):** Les servovalves des commandes de vol sont des pièces d'équipement assez robustes, mais elles sont dotées de mécanismes indicateurs de position sensibles fixés ou intégrés au boîtier. L'emballage typique comprend des boîtes en carton ou en bois. Elles sont solidement attachées au conteneur d'expédition pour éviter tout mouvement et probablement emballées dans de la mousse de la même forme que les pièces. Ils sont souvent emballés dans un sac résistant à l'humidité.

## 10.B. Équipement d'essai et de production

### 10.B.1. Équipement d'essai, d'étalonnage et d'alignement spécialement conçu pour l'équipement visé par l'article 10.A.

**Nature et But:** L'équipement d'essai, d'étalonnage et d'alignement des systèmes de commandes de vol comprend les gabarits et les dispositifs de fixation spécialisés nécessaires au soutien mécanique et à la transmission des signaux d'alimentation et des signaux d'essai électriques aux composants électroniques des capteurs et des actionneurs du sous-système. Ces équipements d'essai peuvent également être utilisés pour l'étalonnage, l'alignement, les essais fonctionnels et opérationnels des actionneurs et des autres sous-composants. Ils se présentent sous la forme de bancs et stations d'essai utilisant soit de l'eau ou un autre fluide comme stimulant, soit les fluides hydrauliques ou les propergols qui seront utilisés pendant l'utilisation opérationnelle.

**Mode de fonctionnement:** Les ordinateurs de la section d'essai fournissent des signaux de direction et de correction simulés aux unités du système de commandes de vol dans des conditions d'essai et enregistrent le

mouvement du déclencheur ou de la gouverne qui en résulte. Chaque sous-système peut être évalué pour la précision du mouvement ainsi que la vitesse de variation et la réponse en fréquence maximale. Les stations d'essai contiennent souvent de l'équipement qui est utilisé pour confirmer l'alignement des gouvernes aérodynamiques par rapport aux positions nulles et commandées.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les systèmes de commandes de vol sont des circuits réglés qui utilisent les informations de rétroaction des actionneurs ou d'autres capteurs. L'équipement d'essai détaillé dans cette section permet non seulement de tester, d'étalonner et d'aligner les gouvernes par rapport aux signaux d'entrée, mais aussi de saisir les données de sortie utilisées pour étalonner et caractériser la performance du déclencheur. Ces données sont utilisées dans le programme de vol pour définir la réponse et les caractéristiques de performance de chaque déclencheur.

**Autres usages:** Cet équipement d'essai peut également être utilisé pour tester, aligner et étalonner l'équipement de commande de vol utilisé dans les avions militaires et civils.

**Aspect (sortie d'usine)** L'équipement d'essai des commandes de vol ressemble à un appareil de laboratoire standard que l'on trouve dans les grandes universités ou les industries aérospatiales, comme les souffleries, les bancs d'essai électroniques, les dispositifs d'étalonnage laser, les bancs d'essai hydrauliques ou hydrodynamiques, etc. L'équipement se composera d'un dispositif d'essai électronique, éventuellement commandé par ordinateur, d'alimentations électriques et éventuellement hydrauliques et d'un équipement mécanique rigide pour monter les déclencheurs et les gouvernes de commande de vol. Des points d'étalonnage et des dispositifs d'alignement peuvent être incorporés à ces supports.

**Aspect (à l'emballage):** L'équipement neuf ou les pièces de rechange de remplacement sont expédiés séparément dans des caisses ou protégés sur des palettes pour le montage sur site. Ils seront solidement fixés à la caisse pour limiter les mouvements et prévenir les dommages. Les gabarits plus petits peuvent être mis en caisses individuelles ou palettisés pour l'expédition.

L'équipement d'essai est généralement fragile et est donc marqué. Il comprendra du matériel informatique, des stations d'essai, ainsi que les éléments de soutien et d'interface correspondants. Il peut y avoir des systèmes de pressurisation hydraulique et des dispositifs d'alignement de précision inclus avec les ensembles. Les articles plus grands peuvent être palettisés ou mis en caisse dans de grandes caisses en bois ou en métal, tandis que les articles plus petits seront dans des boîtes en carton ou en bois.

## 10.C. Matériaux

Aucune.

## 10.D. Logiciel

10.D.1. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié pour «l'utilisation» de l'équipement spécifié dans les articles 10.A., ou 10.B.

**Note:**

*Le «logiciel» mentionnés à l'article 10.D.1 peut être exporté en tant qu'élément d'un appareil ou satellite piloté ou en quantités appropriées pour des pièces de rechange pour un appareil piloté.*

- Australie
- Belgique
- Bulgarie
- Chine
- Égypte
- Allemagne
- Hongrie
- Israël
- Japon
- Portugal
- Fédération de Russie
- Afrique du sud
- Suède
- Taïwan
- Royaume Uni
- Autriche
- Brésil
- Canada
- République Tchèque
- France
- Grèce
- Inde
- Italie
- Norvège
- Roumanie
- République de Corée
- Suisse
- Turquie
- États Unis

Production globale



**Nature et But:** Les logiciels de vol utilisés dans les systèmes de véhicules aériens sans pilote et de fusées fournissent les commandes de contrôle et de direction envoyées aux déclencheurs des systèmes de commandes de vol. Ces déclencheurs modifient ensuite la position des gouvernes des UAV ou modifient le vecteur de poussée de la fusée ou les surfaces aérodynamiques pour modifier la trajectoire du vol. D'autres logiciels sont utilisés pour tester, étalonner, aligner et entretenir les capteurs et les instruments du système des commandes de vol ainsi que le matériel des déclencheurs.

**Mode de fonctionnement:** Le logiciel du système de commandes de vol indique au contrôleur de vol (le "cerveau" du système) comment interpréter et traduire l'information fournie par les capteurs de guidage en commandes de direction à l'intention de chaque déclencheur des commandes de vol. Ces commandes corrigent en permanence la trajectoire de vol du véhicule car des erreurs mineures sont détectées dans l'orientation angulaire (direction de pointage de la fusée ou de l'UAV) et sur la trajectoire de vol. Ils peuvent également être utilisés pour diriger le véhicule vers un nouveau cap de vol en suivant les informations de cap et de trajectoire stockées dans l'ordinateur de vol principal. Divers types de logiciels de soutien

au sol sont utilisés dans les laboratoires et les installations de maintenance pour tester le matériel des capteurs et des déclencheurs ou pour étalonner et entretenir le système après le remplacement d'une ou plusieurs pièces. Les ordinateurs connectés à un banc d'essai peuvent fournir des signaux de simulation appropriés à un capteur de commandes de vol et mesurer sa sortie. La sortie du capteur est également fournie au déclencheur de commande et l'équipement de test mesure sa sortie. Des lasers ou d'autres outils de mesure de haute qualité sont utilisés pour déterminer la précision de l'alignement et du mouvement pour la direction des tuyères de fusée, ou de façon similaire pour les surfaces de contrôle aérodynamiques. Sur la base des spécifications de conception, le technicien de réparation peut ensuite effectuer les ajustements nécessaires pour amener l'équipement aux tolérances de conception.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le logiciel du système de commandes de vol est chargé dans la mémoire de l'ordinateur de vol de l'UAV ou du système de fusée et constitue habituellement une partie fonctionnelle du logiciel de vol. Il est utilisé en vol pour surveiller la position et la trajectoire fournies par le système de guidage. Après avoir évalué ces données à l'aide d'informations préprogrammées, l'ordinateur de vol transmet des commandes de pilotage à chaque déclencheur des commandes de vol pour corriger toute erreur de position détectée.

**Autres usages:** Les logiciels utilisés dans les systèmes de commande de vol des fusées et UAV peuvent également être utilisés dans les avions militaires et civils. Le logiciel de soutien au sol peut également être utilisé dans ces industries pour tester et entretenir les systèmes de contrôle des avions et des fusées. Les logiciels pour les voitures autopropulsées présentent des similitudes sous-jacentes avec les logiciels pour les fusées directrices et les UAV, bien que la mise en œuvre détaillée diffère considérablement.

**Aspect (sortie d'usine)** Ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les médias communs comprenant la bande magnétique, les disquettes, les disques durs amovibles, les lecteurs flash USB, les disques compacts et les documents peuvent contenir ces logiciels et données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique tel qu'internet.

## 10.E. Technologie

10.E.1. «Technologie» de conception pour l'intégration du fuselage, du système de propulsion et des surfaces portantes de véhicules aériens, conçue ou modifiée pour les systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A.2, en vue d'obtenir des performances aérodynamiques optimales avec un véhicule aérien sans pilote à tous les régimes de vol.

**Nature et But:** Le vol atmosphérique stable et contrôlé est un problème de contrôle dynamique très compliqué. Sa résolution nécessite une connaissance approfondie de tous les sous-systèmes et de leurs interactions sur tous les régimes de vol. Ces connaissances sont normalement générées par les essais en soufflerie, la modélisation par ordinateur pour simuler les performances du véhicule et un programme détaillé d'essais en vol. La technologie d'intégration de la conception permet aux concepteurs de systèmes d'UAV (y compris les missiles de croisière) de dimensionner, configurer et optimiser tous les sous-systèmes, de tenir compte de leurs interactions souvent complexes et de minimiser ainsi les erreurs. Ainsi, cette technologie réduit le temps nécessaire pour concevoir, tester et produire un UAV et peut également soutenir les efforts d'amélioration des performances.

**Mode de fonctionnement:** La technologie d'intégration de la conception comprend généralement un programme informatique spécialement conçu utilisé au début d'un programme de développement d'UAV, puis perfectionné pour modéliser les caractéristiques aérodynamiques de la structure, la propulsion, le guidage et les systèmes de commande du véhicule. Le concepteur peut modifier les paramètres du système de commandes de vol, réexécuter la simulation et choisir les paramètres qui donnent les meilleures performances. Plus tard dans le programme de développement, on peut utiliser des simulations "matériel incorporé" qui intègrent des systèmes de commandes de vol ensemble sur un banc d'essai, tandis que ces systèmes sont connectés à un ordinateur qui simule

l'environnement de vol. D'autres équipements d'essai, comme les souffleries, peuvent être utilisés pour reproduire les conditions de vol et les réactions aérodynamiques dans le cadre des simulations.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La technologie d'intégration de la conception est utilisée pour concevoir et intégrer les systèmes de commandes de vol des systèmes d'UAV, y compris les missiles de croisière.

**Autres usages:** Certaines "technologies" utilisées pour concevoir, fabriquer et tester des systèmes d'UAV peuvent avoir une fonctionnalité dans l'industrie aéronautique militaire ou commerciale. Les pilotes automatiques pour les avions avec équipage en sont un exemple. Il y a également des chevauchements dans le savoir-faire nécessaire pour développer des voitures auto-propulsées et des véhicules aériens sans pilote non militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** En général, la technologie d'intégration de la conception des UAV prend la forme d'une expertise en ingénierie parmi les utilisateurs, et cette expertise est susceptible de se refléter dans les programmes informatiques stockés sur supports imprimés, magnétiques, optiques ou autres. Tous les médias communs comprenant la bande magnétique, les disquettes, les disques durs amovibles, les lecteurs flash USB, les disques compacts et les documents peuvent contenir ces logiciels et données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant la technologie d'intégration de conception sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié ou Internet. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique. Les autres technologies d'intégration de la conception comprennent la formation et l'expérience pratique dans des centres technologiques étrangers, par exemple dans des souffleries équipées d'instruments ou dans des installations de matériel en circuit fermé.

10.E.2. «Technologie» de conception pour l'intégration des commandes de vol, du guidage et des informations de propulsion dans un système de gestion de vol, conçue ou modifiée pour les systèmes visés aux articles 1.A. ou 19.A.1, en vue d'optimiser la trajectoire d'un système de fusée.

**Nature et But:** La technologie nécessaire pour contrôler le vol d'un système de fusée est complexe et implique un grand nombre de variables physiques qui doivent être comprises, mesurées et ajustées. Non seulement les concepteurs doivent posséder une connaissance approfondie des sous-systèmes de contrôle de vol des missiles et de leurs interactions, mais ils doivent aussi déterminer des techniques pour résoudre les problèmes de contrôle qui impliquent des vitesses élevées sur une large gamme d'altitudes. Certaines de ces connaissances peuvent se manifester dans la modélisation informatique fondée sur les spécifications du sous-système, les essais en soufflerie et un programme détaillé d'essais en vol. Au fur et à mesure que les missiles deviennent plus perfectionnés, les programmes de mise au point de missiles impliquent des coûts croissants et des délais de mise au point prolongés. Par conséquent, de nombreux pays tentent d'acquérir la technologie nécessaire auprès de sources étrangères afin de réduire le temps et le coût des programmes de développement de missiles.

**Mode de fonctionnement:** L'assistance technique est disponible sous plusieurs formes. L'assistance technique peut se traduire par une formation dispensée par une personne ou des organisations expérimentées dans le développement de systèmes de commandes de vol pour systèmes de fusées, qui fait office de formateur dans une classe sur ou à proximité du site de production ou d'élaboration. Un pays peut recevoir une assistance technique d'une ou de plusieurs entités étrangères qui possèdent les installations de conception et de développement nécessaires pour fournir une expérience pratique permettant de développer la technologie souhaitée. L'assistance technique peut également prendre la forme d'une assistance pour l'achat de machines, d'équipements et de

matériaux. Il est possible que des transferts de technologie contrôlés aient lieu dans le cadre d'activités de soumission et de proposition, après qu'un devis a été demandé, mais avant la signature d'un contrat ou l'exécution de travaux.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Sauf exception limitée, «l'assistance technique» exigée pour construire et développer des systèmes de contrôle de vol de fusée est utilisée uniquement dans ces buts. Les fusées-sondes utilisées pour la recherche météorologique, avec des ajustements mineurs, peuvent être converties en missiles balistiques. La «technologie» utilisée dans chaque dispositif est très semblable. La technologie utilisée dans les missiles balistiques, les SLV et les fusées sondes est à peu près la même, bien que les fusées sondes n'aient pas besoin d'un contrôle précis de leur trajectoire pour atteindre une cible précise.

**Autres usages:** Cette technologie a des applications limitées voire inexistantes en dehors de l'ingénierie des fusées. Il existe des similitudes générales, et quelques détails semblables, avec le savoir-faire nécessaire pour mettre au point des pilotes automatiques d'avion, des voitures autopropulsées et des drones commerciaux, bien que les vitesses élevées et la vaste gamme d'altitudes font de la technologie des commandes de vol des missiles balistiques une catégorie en soi.

**Aspect (sortie d'usine)** En général, la technologie d'intégration de la conception des fusées prend la forme d'une expertise en ingénierie parmi les utilisateurs, et cette expertise est susceptible de se refléter dans les programmes informatiques stockés sur supports imprimés, magnétiques, optiques ou autres. Tous les médias communs comprenant la bande magnétique, les disquettes, les disques durs amovibles, les lecteurs flash USB, les disques compacts et les documents peuvent contenir ces logiciels et données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant la technologie d'intégration de conception sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique. Les autres technologies d'intégration de la conception comprennent la formation et l'expérience pratique dans des centres technologiques étrangers, par exemple dans des souffleries à vitesse élevée équipées d'instruments ou dans des installations de matériel en circuit fermé.

10.E.3. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de «logiciels» mentionnés aux articles 10.A, 10.B. ou 10.D.

**Nature et But:** La technologie nécessaire au développement et à la production de systèmes de commandes de vol pour fusées et UAV est constituée d'un large éventail de connaissances techniques et scientifiques. Il faut posséder des connaissances détaillées et une expertise de travail pour les déclencheurs des commandes de vol (comme ceux utilisés à l'article 10.A.1), la fonctionnalité d'autres équipements de commande d'assiette tels que les aubes à jet (couvertes à l'article 10.A.2) et les servovalves spécialisées (article 10.A.3) si la commande hydraulique est utilisée. De même, il faut des connaissances et une expertise détaillées pour la production et les essais des composants et des sous-systèmes de commandes de vol, y compris la compréhension des équipements d'essai, d'étalonnage et d'alignement (point 10.B.1). En fin de compte, toute cette technologie est le fruit d'une expérimentation appuyée par des calculs et les lois de la physique.



Dans de nombreux cas, la traduction de ces connaissances en logiciels informatiques peut réduire le temps et les dépenses nécessaires à la conception et au développement des commandes de vol des fusées et des UAV. Ces logiciels peuvent comprendre des représentations mathématiques des systèmes de commandes de vol, de la propulsion, du guidage et des sous-systèmes connexes. La technologie des équipements de test, d'étalonnage et d'alignement peut également se présenter en partie comme un logiciel informatique spécialisé. Une grande partie du savoir-faire nécessaire à la mise en œuvre des commandes de vol peut être acquise dans les pays qui disposent déjà de cette technologie, ce qui réduit le temps et les coûts d'un nouvel apprentissage par les seuls essais.

**Mode de fonctionnement:** La technologie générale des commandes de vol comprend de nombreux sujets. La mise en œuvre exige habituellement des équipes d'ingénieurs interdisciplinaires qui travaillent ensemble d'une manière très organisée. Elle est souvent productive pour un programme informatique utilisé au début d'un programme de développement qui modélise la structure de l'avion et les systèmes de propulsion, de guidage et de contrôle du véhicule. Le logiciel simule le comportement du véhicule dans tous les régimes de vol prévus et prédit les performances théoriques. Le concepteur peut modifier les paramètres du sous-système, réexécuter la simulation et choisir les paramètres qui donnent les meilleures performances. Plus tard dans le programme de développement, des simulations "à matériel incorporé" peuvent être utilisées lorsque des sous-systèmes réels sont connectés ensemble sur un banc d'essai et que l'ordinateur simule l'environnement de vol et tout matériel manquant dans la simulation. Certains équipements d'essai, comme les souffleries, peuvent être utilisés pour reproduire les conditions de vol réelles dans le cadre des simulations. Cette technique trouve les effets réels des interactions matérielles, qui peuvent être difficiles à détecter ou à simuler.

Par exemple, la navette spatiale américaine n'a jamais été testée en vol dans sa configuration finale. Bien que de nombreux composants et sous-systèmes aient été largement testés, la navette a volé avec un équipage la première fois qu'elle a été lancée - un événement extrêmement peu probable sans cette technologie.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La technologie générale pour le développement et la production de commandes de vol de missiles est essentielle pour tous les missiles, afin de suivre la trajectoire souhaitée et d'atteindre la cible visée.

**Autres usages:** Les avions commerciaux et militaires nécessitent des commandes de vol, dont la technologie générale comprend de nombreux domaines d'expertise technique qui se chevauchent. De même, les voitures autopropulsées ont besoin de déclencheurs de commande électromécaniques ou hydrauliques pour la direction. Bien que la mise en œuvre détaillée des commandes de vol des missiles puisse être très différente, le transfert de la technologie générale pour ces autres types de véhicules peut toujours s'appliquer aux programmes de missiles.

**Aspect (sortie d'usine)** Dans la mesure où la technologie réside dans le logiciel, la technologie des commandes de vol peut être stockée sur des supports imprimés, magnétiques, optiques ou autres. Tous les médias communs comprenant la bande magnétique, les disquettes, les disques durs amovibles, les lecteurs flash USB, les disques compacts et les documents peuvent contenir ces logiciels et données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant la technologie des commandes de vol sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique.

## Catégorie II - Article 11: Aéro-électronique

## Catégorie II - Article 11: Aéro-électronique

## 11.A. Équipement, assemblages et composants

**Notes:**

1. L'équipement mentionné dans l'article 11.A comprend ce qui suit:
  - a. Matériel de cartographie des courbes de niveau du terrain;
  - b. Matériel de cartographie et de corrélation de scènes (numérique et analogique);
  - c. Équipement radar de navigation Doppler;
  - d. Interféromètre passif;
  - e. Équipements de capteurs d'imagerie (actifs et passifs).
2. «L'équipement» mentionné à l'article 11.A peut être exporté en tant qu'élément d'un appareil ou satellite piloté ou en quantités appropriées pour des pièces de rechange pour un appareil piloté.

11.A.1. Systèmes radar et systèmes radar à laser, y compris les altimètres, conçus ou modifiés pour utilisation dans les systèmes visés par l'article 1.A.

**Notes techniques:**

Les radars à laser utilisent des techniques spécialisées de transmission, de balayage, de réception et de traitement des signaux permettant l'utilisation de lasers pour la télémétrie acoustique, la goniométrie et la discrimination de cibles à partir de l'emplacement, de la vitesse radiale et des caractéristiques de réflexion des corps.

**Nature et But:** Les radars et les radars à laser sont des systèmes sophistiqués de détecteur actif qui peuvent être employés pour la reconnaissance, le ralliement d'un objectif, ou le guidage dans des véhicules aériens sans pilote (UAV), notamment des missiles de croisière. Ces systèmes incluent les technologies de détection et de télémétrie au laser (LADAR) et les technologies de détection à la lumière et de télémétrie. (LIDAR). Ces termes employés souvent de manière interchangeable et génériquement peuvent être employés pour se rapporter aux dispositifs qui utilisent le rayonnement laser pour établir une portée ou prendre l'image d'un objet. Des corrélateurs au radar correspondant à des scènes ont été utilisés dans les UAV, y compris les missiles de croisière et balistiques. Les radars et les altimètres laser sont des dispositifs un peu moins sophistiqués utilisés pour la navigation et l'évitement du terrain dans les missiles de croisière et le déclenchement d'armes dans les missiles de croisière et balistiques. Ces dernières années, des améliorations technologiques significatives se sont produites dans les émetteurs, les récepteurs, les antennes, et le traitement électronique.

**Mode de fonctionnement:** Les systèmes de radar, de LADAR et LIDAR fonctionnent pareillement. Ils émettent une impulsion d'énergie électromagnétique et détectent l'énergie qui leur est réfléchiée à partir du terrain ou de la cible en-dessous. La distance est calculée comme produit de moitié du temps écoulé entre la transmission de signal et la réception, et la vitesse de la lumière. La direction de la cible ou du terrain est donnée par l'angle entre les deux impulsions. L'image du terrain ou de la cible créée de ce fait peut être comparée aux images stockées, et le cours du missile peut être changé au besoin.

- Autriche
- France
- Inde
- Italie
- Norvège
- Afrique du sud
- Suède
- Royaume Uni
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Taïwan
- États Unis

## Production



Le radar et les altimètres de laser fonctionnent pareillement, mais mesurent seulement la distance du missile à la terre. Ces altimètres mesurent avec précision la distance au-dessus du sol pour aider les missiles volant à basse altitude à éviter le terrain et, en comparaison avec les cartes d'altitude, peuvent être utilisés comme aides à la navigation. Les altimètres radar peuvent également être utilisés pour le déclenchement en altitude de missiles balistiques.

Les systèmes de navigation Doppler fonctionnent comme des radars altimètres, mais comparent les fréquences, et non le temps de transit, des faisceaux émis et l'énergie renvoyée. Le changement de fréquence (décalage Doppler) est le résultat du mouvement du missile par rapport au sol et peut être directement converti en vitesse. Plusieurs antennes peuvent mesurer la vitesse des missiles dans n'importe quelle direction si elles reçoivent suffisamment d'énergie retournée. Cette information de vitesse peut être utilisée pour corriger les erreurs de guidage accumulées.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces systèmes sont utilisés dans les missiles de croisière comme capteurs pour la discrimination de cible, le repérage et le déclenchement d'ogive. Ils sont également utilisés comme aides à la navigation pour maintenir le missile sur une trajectoire de vol prescrite et à certaines altitudes de vol. Ces capteurs peuvent également être utilisés pour le guidage terminal ou le déclenchement de missiles balistiques.

**Autres usages:** Les systèmes de navigation radar et Doppler sont utilisés sur les avions et les navires militaires et commerciaux pour la navigation, la détection des conditions météorologiques et la prévention des collisions. Les altimètres radar sont couramment utilisés à de nombreuses fins, par exemple pour déterminer la hauteur au-dessus du relief sur de nombreux types d'appareils. Les LIDAR ont été utilisés pour les mesures atmosphériques, les études océanographiques et les études des émissions de cheminées.

**Aspect (sortie d'usine):** Les systèmes radar pour fusées et UAV (autodirecteurs ou capteurs) sont normalement conçus comme un ensemble unique composé d'un sous-ensemble d'antenne situé à une extrémité du système et des sous-ensembles de puissance, de commande et de traitement situés dans un ou plusieurs boîtiers (séparés mais connectés). Le sous-ensemble d'antenne est normalement un élément rayonnant et récepteur circulaire ou oblong, formant un faisceau, relié à la fois à un amplificateur de puissance et à des guides d'ondes, normalement un tube rectangulaire qui couple le signal de l'amplificateur avec l'élément rayonnant. Les antennes sont plates ou paraboliques et doivent être dimensionnées pour s'adapter au diamètre du missile. Les antennes sont fixées dans des systèmes de balayage électronique ou à cardan dans des systèmes de balayage mécanique.

Les caractéristiques de montage de l'antenne et la structure de support sont suffisamment solides pour maintenir la stabilité et la précision en présence d'accélération importantes causées par le lancement, la turbulence et les manœuvres.

La forme et le poids de la structure de support et des boîtiers des équipements auxiliaires varient considérablement d'un système à l'autre, mais peuvent présenter certaines caractéristiques propres aux applications des missiles. Par exemple, pour aider à réduire la section transversale des missiles et à améliorer le refroidissement, les boîtes d'équipement peuvent avoir une ou plusieurs surfaces cylindriques ou coniques et peuvent avoir des caractéristiques de montage permettant d'assurer un bon contact avec l'enveloppe du missile ou d'assurer l'écoulement du liquide de refroidissement plutôt que des ailettes externes pour le refroidissement à l'air.

Les altimètres de radar sont généralement beaucoup plus petits que des chercheurs de radar ou d'autres sondes avec des antennes émettrices et réceptrices fixes et montées à la surface. Ces antennes, qui doivent être dirigées vers la terre, sont habituellement des plaques plates, rectangulaires, ou circulaires avec une surface de montage conforme à l'extérieur du missile. Les exigences de puissance et de traitement de signal sont de manières significatives inférieures à celles des systèmes de radar autodirecteur. L'émetteur et le récepteur sont normalement inclus dans une boîte reliée à l'antenne par

un câble de liaison coaxiale. Ce sous-ensemble a habituellement un volume de moins de 0,05 m<sup>3</sup> et n'exige pas de refroidissement externe. Un système Doppler type se composant d'un ensemble de récepteur/émetteur/antenne occupe typiquement

0,007 m<sup>3</sup>, pèse moins de 5 kilogrammes, et exige environ une puissance de 12 watts.

Les systèmes LADAR et LIDAR diffèrent des systèmes en ce qu'ils emploient respectivement les longueurs d'ondes visible, plus courtes, et les longueurs d'ondes IR. Ils sont facilement distingués par l'aspect externe d'un objectif optique ou d'une fenêtre. Les systèmes fonctionnant à de plus longues longueurs d'onde IR ont un port optique qui peut sembler être métallique. Comme des antennes de radar, l'unité optique du système est fixe ou mobile, et elle peut être montée séparément. La construction est lourde, avec des bâtis robustes. Généralement, tous ces systèmes ont des surfaces de montage qui ne sont pas peintes mais enduites avec un film conducteur anticorrosif. La mise à la masse électrique de tout le châssis d'aéro-électronique est essentielle à la survie dans les environnements électromagnétiques hostiles

**Aspect (à l'emballage):** Bien que ces systèmes soient conçus pour résister à la manutention et à l'entreposage normaux des missiles et aux environnements de vol difficiles, ils doivent être soigneusement emballés pour éviter que des contraintes inhabituelles ne soient imposées par le conteneur d'expédition et ses environnements. La structure de l'antenne et les systèmes d'entraînement étant particulièrement sensibles, ils sont bien protégés. Les systèmes sont scellés dans une enceinte hermétique et expédiés dans des conteneurs matelassés. Une vaste gamme de contenants extérieurs peut être utilisée, y compris des fûts métalliques, des boîtes en bois et des caisses en composite ou en métal.

11.A.2. Capteurs passifs permettant de déterminer le gisement de sources électromagnétiques spécifiques (équipements radiogoniométriques) ou des caractéristiques de terrain, conçus ou modifiés pour être utilisés dans les systèmes visés à l'article 1.A.

- Australie
- France
- Inde
- Italie
- Norvège
- Afrique du sud
- Suède
- Royaume Uni
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Taïwan
- États Unis

Production



**Nature et But:** Les systèmes de radiogoniométrie fournissent à un véhicule des informations de roulements (orientation angulaire) aux sources connues de rayonnement électromagnétique émanant d'émetteurs au sol. Les caractéristiques du terrain et de la cible peuvent être déterminées par des systèmes d'imagerie, généralement une caméra visible ou infrarouge (IR). Ces systèmes sont passifs parce qu'ils reçoivent mais ne transmettent pas d'énergie; par conséquent, les missiles qui les utilisent sont beaucoup moins susceptibles d'être détectés. Les deux systèmes sont utilisés pour le guidage des UAV et comme capteurs de charge utile et, dans certains cas, ont été utilisés pour le guidage terminal des missiles balistiques.

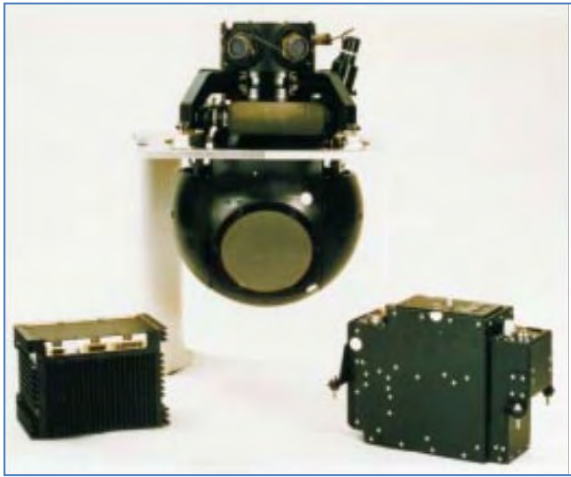


Schéma 99: Une sonde d'image infrarouge pour un UAV (sommets) et son électronique associée. (LFK-GmbH)

longueurs d'ondes visibles ou IR. Les systèmes d'éclairage visible utilisant un flash haute intensité la nuit deviennent ainsi des capteurs semi-actifs. Les capteurs recueillent des images de scènes au sol à des points prédéterminés le long d'une trajectoire de vol préprogrammée. Les images sont numérisées et comparées à des scènes stockées aux mêmes endroits. Les différences entre les deux scènes sont converties en une erreur de position utilisée pour corriger le cap du véhicule. Alternativement, les capteurs d'image peuvent être utilisés dans les guidages à personne intégrée où l'image de la zone cible est relayée à une personne qui pilote réellement le véhicule. L'opérateur peut soit guider l'UAV pour l'impact, soit verrouiller le missile sur la cible, après quoi le missile s'immobilise de manière autonome pour l'impact.



Schéma 100: Un capteur imageur passif est un système infrarouge à rendement élevé pour UAV qui peut admettre jusqu'à six sondes (Northrop Grumman)

**Mode de fonctionnement:** L'équipement de radiogoniométrie utilise des capteurs passifs pour recevoir le rayonnement électromagnétique des émetteurs au sol en divers points connus. Par exemple, la comparaison des temps de transit relatifs des signaux provenant de deux sites ou plus permet à l'ordinateur du missile de déterminer son emplacement et son cap. Ces informations sont utilisées par le système d'instruments de vol intégré pour suivre le plan de vol préprogrammé. Un autodirecteur anti-radiation guide le missile vers la cible en traitant l'énergie radar reçue d'un seul émetteur. Les capteurs d'imagerie peuvent utiliser les caractéristiques du terrain pour naviguer. L'ensemble optique se compose d'un ou de plusieurs objectifs de longueur focale fixe ou variable, d'une image et un réseau photosensible pour convertir la scène en carte numérique. Cet assemblage fonctionne dans les

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les systèmes de guidage inertiels mis à jour par des systèmes d'imagerie peuvent être utilisés pour guider les missiles de croisière avec une précision extraordinaire ou pour le guidage terminal des missiles balistiques. L'équipement de radiogoniométrie peut être utilisé pour guider les UAV, y compris les missiles de croisière, et pour le guidage des têtes de missiles balistiques.

**Autres usages:** Les systèmes de radiogoniométrie sont utilisés dans les avions, les navires et les véhicules terrestres. Les capteurs d'images sont utilisés dans de nombreux systèmes militaires tactiques pour la livraison de munitions, en particulier à partir d'avions. La technologie des capteurs d'imagerie (capteurs et algorithmes) est également largement utilisée en robotique et en photographie. Les systèmes d'imagerie conçus pour les missiles de croisière, cependant, n'ont généralement pas d'applications commerciales.



**Aspect (sortie d'usine):** Les radiogoniomètres se composent de trois ensembles: une antenne ou un réseau d'antennes, un récepteur et un équipement de traitement.

L'antenne est une parabole ou un panneau plat tourné vers l'avant, tel qu'un réseau phasé, généralement monté sur un ensemble à cardan et dimensionné pour être installé dans la structure du véhicule. Le récepteur est un petit ensemble de faible puissance avec des connecteurs pour les sorties de puissance et de signal, et un ou plusieurs connecteurs d'antenne coaxiaux. L'équipement de traitement du signal peut être intégré à d'autres appareils électroniques ou se trouver dans son propre boîtier électronique. L'apparence de ce type d'électronique de traitement du signal varie considérablement et peut refléter les préférences du fabricant plutôt que l'objectif fonctionnel de l'équipement. La taille de l'équipement de traitement du signal varie de quelques centimètres à des dizaines de centimètres d'un côté.

Les capteurs d'imagerie se composent d'un objectif et d'un capteur visible ou IR, ou caméra. Ils sont utilisés avec un ensemble électronique composé d'une alimentation et d'une électronique de commande et de traitement, comme illustré à la Figure 99. Une autre caméra infrarouge est illustrée à la Figure 100. Les capteurs de lumière visible sont reconnaissables à la lentille ou à la fenêtre optique. Le port optique des capteurs de lumière IR peut paraître métallique. Le flash est doté d'une grande fenêtre optique couvrant un réflecteur et un tube de verre.

Les capteurs d'imagerie peuvent être fixes ou mobiles et peuvent être montés séparément du reste de l'équipement de cartographie du terrain. Les caractéristiques de montage optique et la structure de support sont robustes afin de maintenir la stabilité et la précision en présence de fortes accélérations pendant le lancement, les turbulences et les manœuvres. La surface de l'unité près de l'objectif peut être façonnée pour s'adapter au contour du fond du missile parce que l'objectif doit regarder le sol en vol.

**Aspect (à l'emballage):** Les antennes et les éléments optiques peuvent avoir un emballage de protection spécial en raison de leur sensibilité aux chocs. Ces éléments sont scellés dans des boîtiers étanches à l'air et à l'humidité et expédiés dans des conteneurs matelassés. À leur tour, ces colis sont expédiés dans une variété de contenants, y compris des fûts métalliques, des boîtes en bois ou des caisses spécialisées en composite ou en métal.

11.A.3. Équipements de réception pour les systèmes de navigation globale par satellite (GNSS; par exemple GPS, GLONASS ou Galileo) présentant l'une des caractéristiques suivantes, et leurs composants spécialement conçus:

- a. Conçus ou modifiés pour utilisation dans les systèmes visés par l'article 1.A.; ou
- b. Conçus ou modifiés pour des applications aériennes et possédant l'une des caractéristiques suivantes:
  1. Capables de fournir des données de navigation à des vitesses supérieures à 600 m/s;
  2. Utilisant un système de décryptage conçu ou modifié pour les services militaires ou gouvernementaux, permettant d'avoir accès aux signaux/données sécurisés du système GNSS; ou
  3. Spécialement conçus pour utiliser des fonctions antibrouillage (par exemple antenne auto-adaptative ou antenne à pointage électronique) pour fonctionner dans un environnement de contre-mesures actives ou passives.

**Note:**

*Les articles 11.A.3.b.2. et 11.A.3.b.3. ne visent pas les équipements conçus pour les services GNSS commerciaux, civils ou de "sauvegarde de la vie humaine" (par exemple, intégrité des données, sécurité des vols).*

- Chine
- Allemagne
- Japon
- Afrique du Sud
- États-Unis
- France
- Israël
- Fédération de Russie
- Royaume Uni

Production  
Globale



**Nature et But:** Les récepteurs GNSS sont de petites unités électroniques dotées de connexions d'alimentation et d'antenne utilisées pour fournir des informations très précises sur la position et la vitesse du véhicule. Les récepteurs GNSS sont l'une des trois composantes de base du GNSS, les autres étant les satellites en orbite autour de la Terre et les stations de contrôle et de surveillance au sol. Le GLONASS, le Système mondial de localisation (GPS) et Galileo sont des exemples de GNSS, tous basés sur une constellation de satellites actifs qui transmettent continuellement des signaux aux récepteurs terrestres.

**Mode de fonctionnement:** Les récepteurs GPS détectent les signaux radio transmis par les satellites GPS en orbite autour de la Terre sur des orbites connues avec précision. Ces signaux radio

identifient le satellite et contiennent une référence temporelle précise. Le récepteur détermine sa position et sa vitesse en mesurant le retard du signal entre quatre satellites ou plus simultanément et en calculant les résultats sur la base de leur position et d'autres informations contenues dans le signal. GLONASS et Galileo fonctionnent à peu près de la même manière que le GPS. Des récepteurs GPS/GLONASS/Galileo combinés peuvent également être utilisés.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les récepteurs GNSS de qualité militaire et les récepteurs GNSS disponibles dans le commerce conçus ou modifiés pour les systèmes décrits à l'article 1.A. sont utilisés dans les systèmes intégrés d'instruments de vol ou les systèmes de navigation intégrés sophistiqués pour fournir des solutions de positionnement, de navigation et de synchronisation (PNT) très précises aux UAV, notamment aux missiles de croisière. Des récepteurs spécialement conçus peuvent également être utilisés dans les systèmes de fusées pour compléter ou mettre à jour le jeu de guidage et augmenter la précision.

**Autres usages:** Bien que le système GPS ait été conçu à l'origine à des fins militaires, les récepteurs GNSS ont de

nombreuses applications. Les récepteurs GNSS sont utilisés dans l'aviation commerciale et d'autres systèmes de transport, les services de secours et d'urgence en cas de catastrophe, la prospection et la cartographie.

**Aspect (sortie d'usine)** Les récepteurs GNSS sont petits, souvent de quelques centimètres de côté, et assez légers, pesant souvent moins de 1 kg (Figure 102). Les récepteurs GNSS concernés par le MTCR ne peuvent pas toujours être distingués visuellement des récepteurs GNSS non contrôlés car les limites d'altitude et de vitesse sont introduites dans les microcircuits par le firmware. La meilleure façon de déterminer si un récepteur GNSS donné est contrôlé par le MTCR est de se baser sur le modèle de récepteur, le numéro de série et la documentation associée. Figure 101. Les récepteurs GNSS sont également disponibles dans le cadre d'une gamme complète de guides, comme le montre la Figure 101.

**Aspect (à l'emballage):** L'emballage est typique pour les petits articles électroniques coûteux. Ces éléments sont scellés dans des boîtiers étanches à l'air et à l'humidité et expédiés dans des conteneurs matelassés. À leur tour, ces colis sont expédiés dans une variété de contenants, y compris des fûts métalliques, des boîtes en bois ou des caisses spécialisées en composite ou en métal.



**Schéma 101:** Ce système de navigation inertielle GPS est conçu pour fournir un positionnement, une navigation et une synchronisation (PNT) fiables et précis pour les véhicules de lancement et de rentrée critiques. (Northrop Grumman)



**Schéma 102:** *Gauche:* une unité de récepteur/processeur de système de localisation par satellite avec son antenne à plaque. (Aéro-électronique au sextant) *Droite:* une unité de récepteur/processeur de système de localisation mondial (Litton Guidance and Control Systems)

11.A.4. Ensembles et composants électroniques, conçus ou modifiés pour être utilisés dans les systèmes visés par les articles 1.A. ou 19.A. et conçus spécialement pour être utilisés à des fins militaires et à des températures supérieures à 125 °C.

**Nature et But:** L'espace limité sur les systèmes de fusées et les systèmes d'UAV nécessite la conception et la fabrication de systèmes petits mais très performants (haute puissance et densité). Si l'électronique peut être conçue de manière à résister à des températures élevées, le poids des matériaux autrement nécessaires au refroidissement peut être évité. Les assemblages et composants électroniques utilisés dans de telles situations sont le résultat d'efforts considérables de conception et d'essais pour assurer la fiabilité lorsqu'ils sont utilisés dans des environnements à haute température. L'objectif sous-jacent des articles électroniques robustes et tolérants à la chaleur est d'assurer la performance et la fiabilité des systèmes d'armes tout en minimisant le poids et l'espace.

L'équipement spécialisé améliore les performances de navigation des cellules existantes.

Le système TERCOM (Terrain-contour-mapping equipment) combine les mesures radar-altimètre et les données cartographiques numériques du terrain installées dans le système de guidage des missiles.

La cartographie et la corrélation des scènes utilisent des capteurs optiques pour recueillir des informations sur le terrain qui sont ensuite comparées à l'imagerie numérique stockée dans l'ordinateur de vol.

Les radars de navigation Doppler utilisent l'effet Doppler pour suivre les caractéristiques du sol à des fréquences périodiques afin de déterminer la vitesse de la cellule, y compris la dérive latérale. Souvent, l'information radar Doppler est utilisée pour mettre à jour l'information de navigation inertielle vers l'ordinateur de guidage.

L'équipement d'interférométrie passive utilise un corrélateur numérique de zone d'adaptation de scène (DSMAC) pour permettre à un UAV de naviguer vers sa cible en comparant les images capturées par une caméra vidéo à bord d'un avion avec les images numérisées en échelle de gris stockées dans l'ordinateur de vol. En raison des limites de mémoire de l'ordinateur de vol, seules les images de la cible immédiate sont stockées. Ce système est activé une fois que le système de guidage principal navigue sur l'UAV jusqu'à la zone cible.

Les équipements de capteurs d'imagerie peuvent être divisés en deux catégories, active et passive. Les capteurs d'imagerie active nécessitent un signal émis par le capteur pour fonctionner. Des capteurs actifs reçoivent et traitent les signaux réfléchis. Les radars à ouverture synthétique (SAR) ou les radars laser d'imagerie sont des exemples d'équipements actifs de capteurs d'imagerie. Les capteurs d'imagerie passive reçoivent des signaux émis ou réfléchis par des objets dans l'environnement. Des exemples de capteurs d'imagerie passifs comprennent les réseaux optiques sensibles aux spectres visibles, infrarouges ou ultraviolets. Dans la plupart des cas, les données des capteurs d'imagerie sont utilisées pour corriger les erreurs de guidage en corrélant l'image avec les images cibles préenregistrées et en renvoyant les erreurs de position au logiciel de guidage et de contrôle.

**Mode de fonctionnement:** Les assemblages et composants électroniques militaires fonctionnent généralement avec des batteries et fonctionnent comme les autres composants électroniques. Cependant, une plus grande marge de sécurité contre les défaillances y est prévue, et leur fiabilité améliorée a été confirmée par des essais de cycles de température et des essais de vieillissement accéléré.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'électronique tolérante à la chaleur est utilisée dans les calculateurs de guidage, les systèmes de navigation inertielle et les véhicules de rentrée dans les missiles balistiques. Ils sont également utiles dans les radars, les ordinateurs et les systèmes de recherche sur les systèmes d'UAV.

**Autres usages:** Les assemblages et composants électroniques ont des utilisations pratiquement illimitées dans tous les types d'avions militaires et autres systèmes militaires. Les mêmes types des assemblages avec des spécifications similaires sont souvent utilisés dans les avions commerciaux et les navires.

**Aspect (sortie d'usine)** Les assemblages électroniques sont généralement petits et légers, mesurant quelques centimètres de longueur d'un côté et quelques grammes de poids. Les composants de ces assemblages ressemblent à ceux utilisés dans une grande variété d'applications commerciales. Cependant, les assemblages électroniques utilisés dans les applications militaires sont souvent scellés hermétiquement dans des boîtiers métalliques ou céramiques, et non dans les processeurs d'images numériques en plastique transparent (DIP) utilisés pour contenir les assemblages commerciaux. Exception faite des processeurs haute performance comme le processeur de signal numérique quadruple (DSP) (Figure 6) dans un ensemble de modules à puces multiples, qui comprennent des puces mémoire empilées à haute densité pour une vitesse et une capacité mémoire exceptionnelles. La présence de tels dispositifs à coût élevé suggère la possibilité d'une utilisation militaire; cependant, certains assemblages peuvent sembler plus conventionnels, comme celui illustré à la figure 5.

Les ensembles électroniques à usage militaire sont souvent conçus pour dissiper la chaleur. Dans certains assemblages, les dissipateurs thermiques intégrés sont complétés par un refroidissement par eau. Les interfaces de câbles sont équipées de connecteurs circulaires robustes ou de petits connecteurs à boulonner avec des câbles blindés. L'électronique est généralement montée à l'intérieur d'un blindage radiofréquence (RF) extérieur (cage de Faraday), qui peut être hermétiquement scellé ou ventilé à la pression ambiante. Les réservoirs pressurisés sont parfois utilisés pour les fusées et les UAV qui doivent fonctionner à haute altitude afin d'aider à conduire la chaleur vers le boîtier et le montage du dissipateur thermique. Les boîtiers sont principalement faits d'aluminium, avec des surfaces métalliques exposées peintes ou traitées avec des matériaux résistants à la corrosion tels que le nickel.

**Aspect (à l'emballage):** Les ensembles et composants électroniques sont généralement expédiés dans des sacs en plastique marqués pour désigner un dispositif électrostatique sensible, rembourrés dans de la mousse de caoutchouc ou un film à bulles pour la protection contre les chocs, et expédiés dans des boîtes en carton ou, pour les charges supérieures à 20 kg, des caisses en bois.



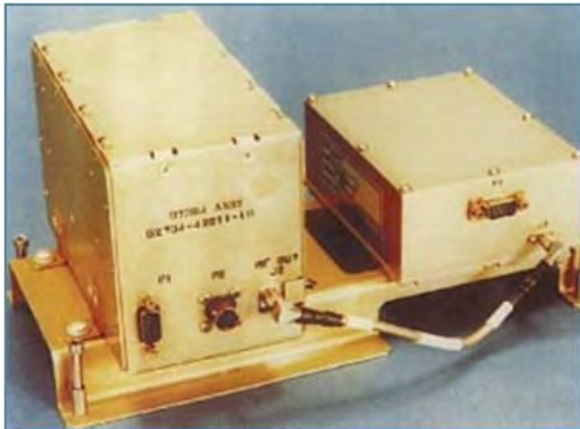


Figure 103: une boîte électronique d'UAV (AAI Corporation)

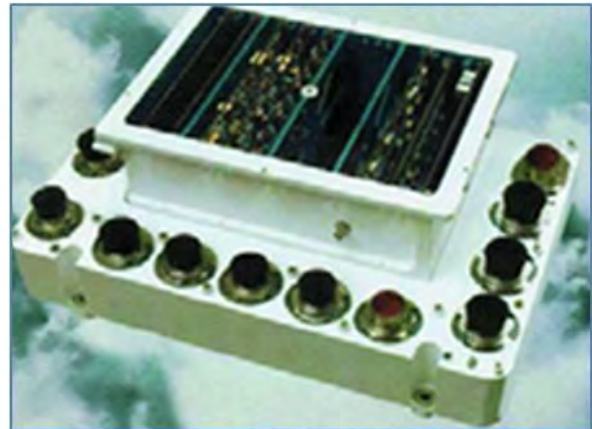


Schéma 104: Processeur de signal numérique avec couvercle enlevé. La taille est de 5 cm à 7,5 cm de chaque côté (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))

#### 11.A.5. Connecteurs électriques ombilicaux et interétages spécialement conçus pour les systèmes visés aux alinéas

##### Notes techniques:

*Les connecteurs interétages visés à l'alinéa 11.A.5. comprennent également les connecteurs électriques installés entre les systèmes visés aux alinéas 1.A.1. ou 19.A.1. et leur «charge utile».*

- Allemagne
- Russie
- États-Unis

Production  
globale



**Nature et But:** Des connecteurs électriques ombilicaux et entre étages sont utilisés pour relier les étages de missiles, le système de guidage et la charge utile ainsi que la fusée au lanceur. Les connecteurs électriques de l'ombilical et entre les étages peuvent fournir des informations sur le codage du lancement, l'état de fonctionnement et les fluides de refroidissement nécessaires pour le système de guidage.

**Mode de fonctionnement:** Les ombilicaux relient une fusée à l'équipement de soutien au sol sur la plate-forme de lancement, le silo ou le monte/lanceur. Les ombilicaux sont

maintenus en place mécaniquement et libérés juste avant le lancement au moyen d'un activateur. Cet activateur peut être à ressort ou activé par un pétard qui explose et qui va séparer mécaniquement l'ombilic ou le connecteur du système de largage. D'autres ombilicaux sont libérés par le mouvement vers l'avant du véhicule pendant le lancement et retirés de l'enveloppe de lancement pour s'assurer que l'ombilic ne frappe pas la fusée.



**Utilisations typiques liées aux missiles:** Des connecteurs ombilicaux et entre étages permettent aux fusées de recevoir des informations et de surveiller et d'interroger le système.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Selon le type de connecteur électrique interétage, il aura de nombreuses broches ou prises et la plupart des connecteurs auront un collier de verrouillage. Les ombilicaux auront une face plane, normalement faite d'une résine époxy ou d'un plastique dur. La face avant de l'ombilical peut comporter à la fois des broches et des douilles et peut également comporter des connecteurs pour le refroidissement liquide du système de guidage.

**Aspect (à l'emballage):** Les têtes ombilicales et les connecteurs électriques entre les étages seront enveloppés dans un plastique antistatique, normalement de couleur grise ou rose. En raison du grand nombre de fils, les connecteurs électriques de l'ombilical ou de l'étage intermédiaire peuvent contenir des connecteurs électriques qui seront emballés en tenant compte de la protection du rayon de courbure. Pour éviter d'endommager ces fils, le câble sera très probablement enroulé en grand cercle.

## 11.B. Équipement d'essai et de production

Aucune.

## 11.C. Matériaux

Aucune.

## 11.D. Logiciel

11.D.1. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié pour «l'utilisation» de l'équipement spécifié à l'article 11.A.1.

**Nature et But:** Les radars UAV, les radars laser et les radars laser IR utilisent des logiciels pour interpréter et traduire les signaux réfléchis en informations de reconnaissance, de poursuite de cible ou de guidage (en utilisant des techniques de reconnaissance du terrain). L'équipement de radiogoniométrie utilise un logiciel de navigation pour déterminer (à la réception de deux balises de navigation ou plus) la position et le cap d'un véhicule. Les systèmes de navigation automatisés peuvent utiliser cet équipement et des plans de vol préprogrammés pour guider un véhicule volant vers sa zone cible. Les capteurs d'imagerie peuvent alors utiliser des techniques de cartographie du terrain pour le guider, lui ou son arme, vers sa cible. Les systèmes radar Doppler sont utilisés dans les UAV pour déterminer la vitesse et peuvent être utilisés dans les missiles balistiques si les systèmes Doppler peuvent recevoir une énergie réfléchie suffisante.

**Mode de fonctionnement:** La suite aéro-électronique de capteurs, d'intégrateurs et d'ordinateurs forme une série de systèmes redondants qui permettent une navigation très précise avec le missile de croisière. Chacun de ces capteurs recueille des informations spécifiques à partir de signaux actifs au sol (balises de localisation) et de sources passives (réflexions radar d'objets connus et cartographiés) et fournit des signaux de navigation à un ordinateur de vol qui augmente les sources du système de guidage inertiel. Un logiciel de guidage des missiles est utilisé pour interpréter ces données de capteurs et décider des corrections à apporter à la trajectoire de vol du missile. Ces fonctions logicielles font toutes partie intégrante du programme de vol embarqué.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces dispositifs sont utilisés pour soutenir les systèmes d'UAV et la navigation des missiles balistiques.

**Autres usages:** Les radars, les systèmes laser et l'équipement de radiogoniométrie sont tous utilisés dans les avions civils et militaires pour augmenter les systèmes de navigation inertielle.

**Aspect (sortie d'usine):** Généralement, les logiciels de systèmes radar, les logiciels utilisés avec des capteurs passifs et les logiciels de vol adaptés aux systèmes 1.A. prennent la forme de programmes informatiques stockés sur des supports imprimés, magnétiques, optiques ou autres. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

11.D.2. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié pour «l'utilisation» de l'équipement spécifié dans l'article 11.A.3.

**Nature et But:** Le logiciel GNSS traite les signaux satellites en informations de position qui sont ensuite utilisées dans les systèmes de guidage des systèmes de fusée ou d'UAV. Le traitement peut également inclure les algorithmes de décryptage qui permettent au récepteur d'avoir accès à des informations de positionnement militaire plus précises.

**Mode de fonctionnement:** Les récepteurs GNSS renforcés peuvent être installés dans des systèmes de fusée ou d'UAV. Le logiciel GNSS résout les algorithmes impliquant ces signaux et obtient des informations précises sur la position et la vitesse. Ce logiciel fait généralement partie intégrante du logiciel de vol embarqué.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le récepteur GNSS peut être utilisé pour augmenter les données de position et de vitesse fournies par l'instrument inertiel, ou il peut servir de source principale pour cette information.

**Autres usages:** Le logiciel GNSS est spécialisé et est conçu pour fonctionner avec des récepteurs GNSS spécifiques. Les systèmes civils (moins précis) pourraient être mis à niveau vers des systèmes conformes aux normes militaires (précision de position <6 mètres dans n'importe quelle direction, information plus précise sur la vitesse) en décodant l'information plus précise sur la synchronisation des satellites disponible des nouveaux signaux GPS civils qui sont lentement mis en ligne dans le cadre du Programme de modernisation du GPS. De nouveaux satellites ont commencé à diffuser les nouveaux signaux GPS civils en avril 2014, et le Programme de modernisation du GPS devrait avoir tous les nouveaux signaux civils sur 24 satellites GPS à la fin des années 2020.

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, ce logiciel GNSS se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données. Les récepteurs GPS du MTCR ne peuvent pas toujours être distingués visuellement des récepteurs GPS non contrôlés parce que les algorithmes d'altitude et de vitesse sont configurés par firmware ou par logiciel.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

## 11.E.

11.E.1. «Technologie» de conception pour la protection des sous-systèmes aéroélectroniques et électriques contre les risques d'impulsion électromagnétique (IEM) et de perturbation électromagnétique provenant de sources extérieures, comme suit:

- a. «Technologie» de conception des systèmes de protection;
- b. «Technologie» de conception de la configuration des circuits et sous-systèmes électriques résistant aux rayonnements;

11.E.2. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de «logiciels» mentionnés aux articles 9.A., 11.A. ou 11.D.

- Chine
- Japon
- Royaume Uni
- France
- Fédération de
- États Unis

Production globale



**Nature et but:** Les technologies EMP et EMI sont utilisées pour améliorer la survie des systèmes dans des environnements où le bruit RF d'origine humaine est intense, en particulier le bruit RF causé par la détonation d'armes nucléaires. La technologie utilise au moins trois approches, souvent simultanément: elle configure les circuits sensibles afin de minimiser les interférences; elle enferme les circuits dans des boîtiers conducteurs; et elle protège les fils d'entrée/sortie (E/S) par des dispositifs antiparasites, généralement juste à l'intérieur du boîtier conducteur.

Bien que la technologie utilisée pour protéger les circuits contre les PEM et les IEM soit commune et ordinaire, la détermination des exigences et leur mise en œuvre constituent des problèmes difficiles et complexes. Les topologies des circuits, l'utilisation de dispositifs de suppression, les modèles de prévision des effets des armes et la génération de critères peuvent être étudiés par des programmes informatiques interactifs qui reçoivent les paramètres des armes et des systèmes et les utilisent pour évaluer les environnements dangereux tels que les champs et les niveaux actuels.

**Mode de fonctionnement:** La protection EMP et EMI est généralement passive. Les boîtiers RF dissipent l'énergie RF sous forme de courants électriques dans la surface extérieure conductrice. Les couvercles et les portes sont munis de couvercles et de portes afin de s'assurer que les champs ne peuvent pas s'infiltrer dans une enceinte; des joints et des grilles métalliques sont généralement utilisés pour sceller ces ouvertures. Les dispositifs de suppression d'E/S court-circuitent simplement les champs électriques à la terre ou fournissent une impédance élevée (c'est-à-dire une opposition électrique) par des bobines et filtres RF. Cependant, certains dispositifs de suppression comme les diodes Zener, les transorbs, les éclateurs et les varistances à oxyde métallique modifient leur impédance à certains niveaux de tension ou de courant.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La technologie de conception EMP et EMI est utilisée dans les missiles balistiques pour protéger l'ensemble de guidage et l'équipement électronique du véhicule de rentrée contre les effets EMP et EMI des détonations nucléaires à proximité. Elle est également utilisée pour protéger les dispositifs pyrotechniques tels que les systèmes de séparation des étages contre un allumage prématuré. Cette technologie peut être utilisée dans les systèmes d'UAV, mais il suffit généralement de les protéger contre des niveaux inférieurs de PEM et d'IEM rencontrés à une distance considérable des explosions nucléaires ou d'autres sources de brouillage.

**Autres usages:** La technologie de conception EMP et EMI est utilisée dans les satellites, certains avions militaires et certains systèmes d'armes. Une technologie EMI similaire est utilisée dans la conception de certains systèmes électroniques commerciaux tels que les radios à ondes courtes et les équipements stéréo pour réduire ou prévenir les interférences d'autres appareils électriques. Les parafoudres pour parafoudre sur les alimentations et les cordons d'alimentation sont un autre exemple de protection EMP/EMI.



Schéma 105: Un choix de dispositifs d'interface de suppression électromagnétiques (Sabritec)

**Aspect (sortie d'usine):** Cette technologie de conception peut prendre la forme d'une assistance technique, y compris des services de formation et de conseil. La technologie peut également prendre la forme de modèles, de plans, de diagrammes, de formules, de conceptions et de spécifications techniques, de manuels et d'instructions écrits ou enregistrés sur d'autres supports ou dispositifs comme les disques, bandes et mémoires de lecture seulement.

Une partie de la technologie de conception est véhiculée par l'équipement lui-même. Les assemblages sont blindés RF dans des boîtiers métalliques, généralement en aluminium. Pour des applications très légères, on utilise des boîtiers en plastique composite durable ou robuste avec une fine couche de métal pour le blindage RF. Le revêtement est généralement en aluminium, souvent sur la surface intérieure de la boîte. Les surfaces métalliques exposées sont souvent peintes ou traitées avec des matériaux résistants à la corrosion tels que le Nickel. Certains dispositifs de suppression des interférences électromagnétiques sont illustrés à la Figure 105. Un préamplificateur EMI/EMP est représenté à la Figure 106. L'électronique est protégée par le périmètre en aluminium qui sert de cage de Faraday RF lorsqu'elle est hermétiquement scellée par les modules et le couvercle correspondants. La surface en aluminium sous le circuit imprimé sert de cloison RF des modules internes. Le motif des boulons du couvercle est espacé de quelques centimètres afin d'éviter des espaces dans la fermeture et de maintenir une pression uniforme.

sur un joint RF qui peut être en métal mou, en métal chargé, en ressort métallique ou en treillis métallique. L'électronique EMI/ EMP peut prendre pratiquement n'importe quelle forme pour s'adapter aux contraintes d'espace.

**Aspect (à l'emballage):** La technologie sous forme de rapports, de données et de programmes générateurs de critères peut être présentée dans des enveloppes commerciales surdimensionnées ou dans des emballages ordinaires de distribution de masse sur support électronique informatique. Les ensembles électroniques EMP/EMI sont généralement expédiés avec une protection antichoc en mousse de caoutchouc ou en papier bulle dans du carton ou, s'ils pèsent plus de 20 kg, dans des boîtes en bois. Ils sont parfois expédiés dans des sacs en plastique marqués ESD (sensible à l'électrostatique), même s'ils ne sont pas sensibles aux ESD.

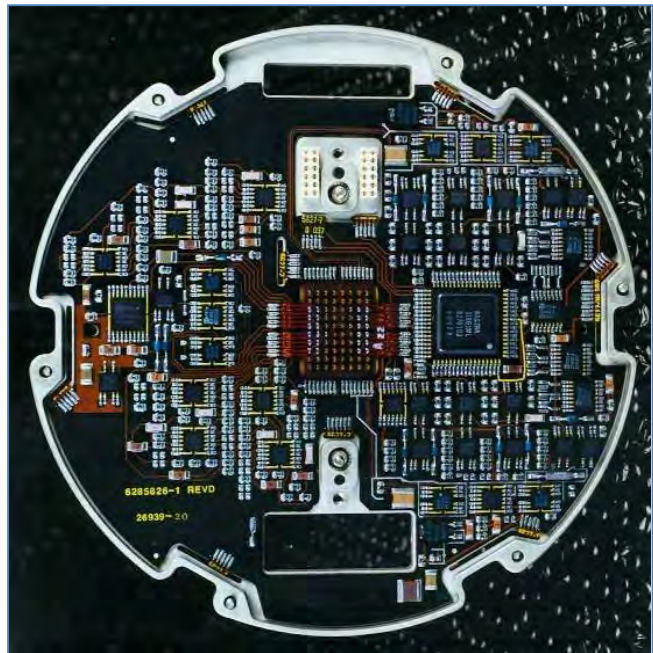


Schéma 106: Module électronique à impulsion électromagnétique / interférence électromagnétique (Sabritec)



## Catégorie II - Article 12: Soutien au lancement

## Catégorie II - Article 12: Soutien au lancement

## 12.A. Équipement, assemblages et composants

12.A.1. Appareils et dispositifs pour la manutention, le contrôle, la mise en œuvre et le lancement, conçus ou modifiés pour être utilisés dans les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2.



**Schéma 107: Un revêtement de silo soulevé pour être installé dans le puits de missile d'un complexe de lancement en construction (The Boeing Company)**

**Nature et But:** Les appareils et dispositifs comprennent les installations de la rampe de lancement, les portiques, les block houses, les silos de lancement souterrains, le matériel de manutention, le matériel de vérification et d'essai des systèmes, le matériel de ravitaillement, le matériel d'alignement et le matériel de contrôle et de commande. Certains de ces équipements sont relativement simples, comme les plates-formes de lancement en béton. D'autres éléments - tels que les plates-formes de lancement sophistiquées et les installations de lancement de type portique utilisées pour les lanceurs spatiaux (SLV) modernes - sont beaucoup plus complexes. Le facteur déterminant pour l'inclusion sous 12.A.1. est de savoir si l'article est conçu ou modifié pour les systèmes spécifiés sous 1.A., 19.A.1. ou 19.A.2.

**Mode de fonctionnement:** Le type d'équipement utilisé lors du lancement d'un missile balistique dépend de la nature par laquelle le missile est livré au site de lancement. Dans la plupart des cas, le missile est livré sur le site par un camion, un train ou, sur une plate-forme de lancement, un chariot. Le missile est ensuite positionné soit par des monteurs spéciaux construits pour le site et le missile, soit par une grue fixée à un portique permanent. Dans les silos, les missiles sont positionnés par une grue sur le transporteur, qui descend le missile dans le silo; ou bien, les étages de missiles sont abaissés par une grue ou un treuil dans le silo et assemblés dans le silo (Figure 107).

Les systèmes complets de guidage de fusée sont souvent alignés et étalonnés à l'aide de boussoles et/ou d'équipement d'arpentage. Cette opération d'alignement peut être effectuée dans un premier temps, puis régulièrement mise à jour avant le lancement. De nombreux systèmes de guidage sont capables de s'auto-aligner en détectant la rotation de la terre. Avant le lancement, les données des cibles et le profil de vol sont chargés dans le système de guidage. Les performances du sous-système sont vérifiées au moyen d'équipements d'essais électriques et logiciels fixés au missile par des câbles. Les missiles maintenus en alerte sont vérifiés en permanence. Lorsque l'état de toutes les réponses est vérifié comme satisfaisant, le véhicule est prêt pour le lancement, et la séquence de lancement est exécutée sur commande. Les véhicules aériens sans pilote (UAV), en particulier les

missiles de croisière, sont généralement conçus pour de multiples plateformes de lancement (avec des interfaces normalisées).



**Schéma 109:** Une plateforme de lancement avec une navette spatiale sur une plate-forme mobile de lanceur avant le lancement (NASA)



**Schéma 108:** Plateforme de lancement minimale avec portique et connexions à un système de fusée complet. (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'équipement de soutien au lancement est nécessaire pour préparer et lancer les missiles. Certains de ces dispositifs (systèmes de guidage et équipement de commandement et de contrôle) continuent de surveiller et de contrôler le missile sur tout ou partie du profil de vol.

- Australie
- Brésil
- France
- Inde
- Israël
- Japon
- Corée du Nord
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Taiwan
- États Unis
- Argentine
- Chine
- Allemagne
- Iran
- Italie
- Pays Bas
- Pakistan
- Suède
- Royaume Uni

Production  
globale



**Autres usages:** Les systèmes hydrauliques, l'électronique de commande, les ordinateurs, les réservoirs et tuyaux et le matériel de communication nécessaires au lancement des missiles sont semblables, sinon identiques, à ceux qui sont nécessaires à de nombreuses autres fins. Le transport, la manutention, l'équipement de montage et les algorithmes de ciblage et d'essai sont souvent uniques à chaque missile, sans autres utilisations. L'équipement de soutien au lancement basé sur des silos est souvent unique, conçu spécifiquement pour le lancement de missiles balistiques et n'a aucune utilisation commerciale.

**Aspect (sortie d'usine)** Les installations de plateforme de lancement pour les lanceurs spatiaux modernes sont extrêmement grandes et complexes. Elles se composent de bâtiments d'assemblage des lanceurs séparés, de grands véhicules chenillés (plateformes mobiles de lancement) pour transporter les lanceurs spatiaux depuis leur lieu d'assemblage jusqu'à la plateforme de lancement, et de portiques fixes (Figure 108).

Les plateformes pour le lancement de systèmes plus petits peuvent posséder un masque en béton, un support relativement petit sur lequel est placé le missile et un portique en poutres d'acier. Les plates-formes de lancement destinées aux opérations militaires sont généralement dépourvues d'installations d'entreposage, de pompage ou de manutention du propergol; ces opérations sont effectuées à partir de camions-citernes et de camions-pompes. Elles ne disposent pas non plus d'équipement permanent de commandement de lancement, de contrôle et de vérification des systèmes; encore une fois, ces opérations sont effectuées par des camions.

**Aspect (à l'emballage):** La taille même des plates-formes de lancement, des portiques et des silos dicte que ces appareils sont habituellement construits sur place et rarement expédiés assemblés. En fonction de leur taille et de leur poids, les composants électroniques et les consoles sont emballés et scellés dans un rembourrage pour les protéger des chocs et de l'humidité pendant le transport et le stockage, puis emballés séparément dans des boîtes ou des caisses. L'équipement électronique utilisé dans certains petits et moyens abris de contrôle de lancement est souvent installé dans l'abri, et l'ensemble de l'abri est monté sur une palette pour le transport. Certains équipements électroniques de soutien au lancement sont portables et ont été réduits à la taille d'une valise.

#### 12.A.2. Véhicules pour le transport, la manutention, le contrôle, la mise en oeuvre et le lancement, conçus ou modifiés pour être utilisés dans les systèmes visés à l'article 1.A.

- Australie
- Chine
- France
- Inde
- Irak
- Italie
- Libye
- Pakistan
- République de Corée
- Syrie
- Royaume Uni
- États Unis
- Biélorussie
- Brésil
- Égypte
- Allemagne
- Iran
- Israël
- Japon
- Corée du
- Fédération de Russie
- Espagne
- Ukraine

Production globale



**Nature et But:** Les fusées et UAV couverts par l'article 1.A. Ont été lancés par des camions, trains, avions, navires et sous-marins. A l'exception des UAV plus gros et plus puissants, capables de décoller de manière autonome, la plupart des tirs de roquettes et de missiles (y compris à partir de sites fixes) nécessitent des véhicules, notamment pour le transport et la manutention.

Les véhicules modifiés pour transporter, ériger et lancer des missiles se distinguent parce qu'ils n'ont généralement aucune autre utilisation pratique. Certains de ces véhicules, appelés transporteurs, monteuses et lanceurs (TEL), offrent une plate-forme de lancement mobile indépendante des installations de lancement permanentes. Les missiles peuvent aussi être transportés et lancés à partir d'un érecteur lanceur (mobiles) (MEL ou EL), qui sont souvent tractés par des camions connus sous le nom de camions porteurs. Les véhicules modifiés pour transporter l'équipement de commandement et de contrôle nécessaire pour activer, cibler et contrôler les fusées ou les UAV sont également distincts. Le point 12.A.2. contrôle le véhicule, y compris l'équipement embarqué, dont certains seraient visés au point 12.A.1 s'ils étaient retirés du véhicule.



**Mode de fonctionnement:** Les TEL et autres lanceurs mobiles remplissent les mêmes fonctions de préparation et de lancement que les installations de soutien au lancement visées au point 12.A.1. Un TEL est généralement chargé avec sa fusée ou son UAV par une grue (qui peut faire partie du TEL) à une zone de rassemblement. Le TEL transporte la fusée ou l'UAV jusqu'au site de lancement, où il l'érige en position de lancement. Certains missiles sont alimentés à ce stade par des camions-citernes et des camions-pompes séparés; d'autres peuvent être transportés déjà alimentés en carburant. L'équipe de lancement établit les connexions électriques avec le véhicule et s'assure que tous les sous-systèmes sont prêts pour le lancement. L'information sur le ciblage ou le plan de vol est chargée, et le système de guidage est aligné et calibré avant le lancement.



Schéma 111: Au-dessus: Véhicule-rampe à huit et quatre essieux portant des missiles balistiques intercontinentaux (ICBM; au premier plan) et des missiles balistiques à moyenne portée (IRBM). (Par l'intermédiaire de l'Internet chinois)

Schéma 112: En haut à droite: Un transporteur de missile de croisière à lanceur naval. ( Par l'intermédiaire de l'Internet chinois)

Schéma 110: Droite: Un véhicule de contrôle au sol (véhicule, à gauche) peut gérer différents systèmes de véhicules aériens sans pilote (AAI Corporation)



**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les systèmes complets de fusées et les UAV nécessitent des véhicules conçus ou modifiés pour le système, tels que les TEL et/ou les véhicules de commande et de contrôle et de soutien associés.

**Autres usages:** Ces véhicules, leurs systèmes hydrauliques, l'électronique de commande, les ordinateurs et le matériel de communication proviennent généralement d'une grande variété d'équipements commerciaux et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** Les TEL conçus pour les missiles balistiques se distinguent par la présence d'un mécanisme de levage capable de soulever le missile en position verticale. Le véhicule peut être suivi, mais la plupart sont de gros véhicules de la taille d'un tracteur à semi-remorque ou d'un camion, avec 3 à 8 essieux et des pneus en caoutchouc. Des exemples de ce type de véhicules sont illustrés à la Figure 110.

Les TEL ou MEL conçus pour les UAV se caractérisent par leur relative simplicité et la présence d'une structure de lancement (comme un rail ou un conteneur), qui est parfois inclinée pour le lancement. La structure de lancement peut varier considérablement en taille et en poids, selon les UAV qui seront lancés. Les structures de lancement peuvent être aussi petites que 2 à 3 m pour les lanceurs d'UAV à assistance hydraulique ou assistée par fusée. Des structures de lancement similaires peuvent être montées sur un véhicule à chenilles ou à roues (Figure 111). Un exemple de camion de commande et de contrôle qui pourrait accompagner les TEL et les MEL est illustré à la Figure 112.

**Aspect (à l'emballage):** Les rails de lancement et les mécanismes de montage utilisés sur les TEL ou MEL sont généralement intégrés dans le châssis du véhicule ou de la remorque. Par conséquent, ces dispositifs sont placés dans leur position d'arrimage normale sur le véhicule mobile ou la remorque lorsqu'ils sont emballés pour être expédiés de l'installation de production. Les véhicules sont conduits, remorqués ou expédiés par train jusqu'à l'installation de l'utilisateur. Les autres véhicules seront emballés de la même façon que les autres véhicules militaires ou commerciaux.





Schéma 113: un érecteur-lanceur détaché de son appareil moteur. Annexe sur les équipements, le logiciel et la technologie du MTCR Manuel, Troisième édition (Mai 2005)). Droite supérieure: un transporteur-érecteur-lanceur pour grand missile de croisière de catégorie II (Équipement de MTCR, logiciel et manuel de technologie, troisième édition (mai 2005)) Droite inférieure: L'érecteur-lanceur pour un véhicule aérien sans pilote assisté par fusée et son fourgon de commande et contrôle. (Teledyne Ryan Aeronautical)



Schéma 114: Un lanceur pneumatique de véhicules aériens sans pilote Droite: Véhicules de commande et contrôle pour le lancement de missiles depuis des endroits fixes ou mobiles. (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))

12.A.3. Gravimètres, gradiomètres de gravité et leurs composants spécialement conçus, conçus ou modifiés pour une utilisation aéroportée ou marine, et utilisables dans les systèmes visés à l'article 1.A.

a. Gravimètres présentant toutes les caractéristiques suivantes:

1. ayant une précision statique ou opérationnelle supérieure ou égale à  $7 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$  (0,7 milligal),
2. avec un temps de stabilisation inférieur ou égal à 2 minutes,

b. Gradiomètres à gravité.

- *Gravimètres relatifs*
- Canada
- Chine
- Allemagne
- Fédération de Russie
- États-Unis
- *Gradiomètres à gravité.*
- États-Unis

Production  
globale



**Nature et But:** Comme la terre n'est pas une sphère parfaite, l'intensité de son champ gravitationnel fluctue à sa surface. Les changements de topographie, d'altitude, de latitude et de densité souterraine peuvent affecter la force de gravité. Les gravimètres et les gradiomètres à gravité mesurent très précisément l'amplitude de la force de gravité à divers endroits. Ces données sont utilisées pour créer des cartes détaillées du champ gravitationnel de la Terre sur plusieurs kilomètres autour d'un site de lancement de missile balistique, car les variations locales de la gravité peuvent entraîner des imprécisions dans le guidage inertiel, sauf si elles sont prises en compte dans le logiciel de guidage du missile. Les avions, les hélicoptères, les navires et les sous-marins équipés de gravimètres peuvent établir des cartes gravimétriques en mer. Les avions et les hélicoptères équipés de gravimètres peuvent établir des cartes gravimétriques sur des terrains montagneux. Les gradiomètres à gravité peuvent également être utilisés comme capteurs dans les systèmes de guidage pour améliorer la précision.

**Mode de fonctionnement:** Les modes de fonctionnement varient selon les différents types d'équipement. Certains mesurent avec précision le temps de chute d'une masse tombée; d'autres utilisent un ensemble d'accéléromètres pendulaires électromagnétiques à rééquilibrage de force qui tournent sur un carrousel. Certains sont exploités avec l'avion, le navire ou le sous-marin en mouvement, tandis que d'autres sont abaissés à la surface de la terre ou du fond marin pour prendre une mesure. Les systèmes conçus pour fonctionner sur une plate-forme mobile telle qu'un navire ou un avion ont besoin de gyroscopes et d'accéléromètres de qualité pour la navigation inertielle afin de stabiliser la plate-forme du capteur sur deux axes. Les systèmes conçus pour être abaissés à la surface de la terre ou du fond marin n'ont seulement besoin de s'auto-niveler. Les gradiomètres gravimétriques utilisent un ensemble d'accéléromètres de très haute qualité sur un plateau tournant de précision. Lorsque les accéléromètres tournent dans un plan horizontal, ils détectent les subtiles différences de gravité sur le périmètre de la plaque tournante. La différence entre les lectures moyennes prises du côté est et du côté ouest de la table tournante, divisée par le diamètre de la table tournante, donne le gradient de la pesanteur longitudinale.

De même, la différence entre les lectures moyennes prises sur les côtés nord et sud de la platine, divisée par le diamètre de la platine, donne le gradient de pesanteur à latitudinal. L'utilisation de plusieurs accéléromètres réduit l'effet de la dérive des facteurs d'échelle de chaque accéléromètre, et la rotation des accéléromètres autour du périmètre élimine pratiquement l'effet de la dérive de polarisation.



**Schéma 115:** Ce gravimètre automatisé est l'un des plus précis, robustes et légers. Dans des conditions normales, il peut être mis à niveau pour des mesures mgal dans les 30 secondes, et a un taux de dérive de moins de 0,5 mgal par mois à maturité (ZLS Corporation)

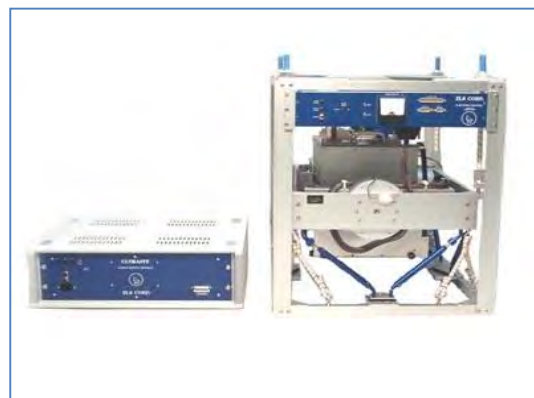
**Utilisations typiques liées aux missiles:** Des cartes gravimétriques de plusieurs à plusieurs centaines de kilomètres dans la zone des sites de lancement de missiles balistiques sont nécessaires pour des systèmes très précis. Les gravimètres aéroportés peuvent être utilisés pour cartographier une grande zone de terrain accidenté ou de mer ouverte adjacente à des routes de montagne ou d'autres zones où des missiles mobiles pourraient opérer. Les gravimètres des navires ou des sous-marins sont utilisés pour cartographier l'attraction gravitationnelle sous la mer afin de faciliter une précision accrue des missiles balistiques lancés à partir de sous-marins ou d'installations terrestres près de la côte. Comme les effets des variations de gravité dans la zone de lancement sont plutôt faibles, les cartes gravimétriques sont surtout utiles pour les systèmes de missiles balistiques qui sont déjà très précis. Les gradiomètres gravimétriques peuvent être utiles pour le guidage des UAV, peut-être au-dessus de l'eau ou d'autres terrains sans relief.

**Autres usages:** Les gravimètres et les gradiomètres gravimétriques sont utilisés pour l'exploration des ressources pétrolières et minérales, le génie civil, la cartographie

géophysique, l'exploration géotechnique et archéologique, les études sur les eaux souterraines et environnementales, la recherche tectonique, la recherche volcanologique et la recherche géothermique. Les gradiomètres gravimétriques sont utilisés comme aides à la navigation à bord des sous-marins.

**Aspect (sortie d'usine):** Les gravimètres et les gradiomètres à pesanture sont des instruments électroniques et mécaniques de haute qualité et sensibles. L'apparence des gravimètres varie considérablement parce que les entreprises les construisent différemment pour des usages différents. Les systèmes entièrement intégrés dans un seul boîtier peuvent être aussi petits que 25 cm x 32 cm x 32 cm et peser aussi peu que 6 kg (avec batterie)(Figure 115). Les systèmes avec des caisses séparées peuvent être aussi grands qu'un mètre cube et peser 350 kg; ces grands systèmes sont modulaires et peuvent être emballés dans plus d'un conteneur pour l'expédition. L'unité de détection des gravimètres air-mer - conçue spécifiquement pour les applications maritimes et aéroportées (Figure 116) – est difficile à spécifier car elle dépend des caractéristiques du navire, des conditions en mer et de la précision de navigation (généralement autour de 1 mGal). De tels systèmes sont contrôlés par le RCTM s'ils répondent aux critères de performance spécifiés à l'article 12.A.3.

Les composants électroniques et mécaniques sont enfermés dans des boîtiers en plastique dur ou en métal. Certains systèmes ont le tableau de bord et le tableau de commande contenus dans le même boîtier; d'autres systèmes ont les instruments séparés des tableaux de commande. Les boîtiers comportent généralement des panneaux de commande électroniques ou mécaniques visibles, des plaquettes, des boutons de commande rotatifs, des interrupteurs à bascule et des interrupteurs à poussoir, ainsi que des connexions pour les câbles électroniques et informatiques externes.



**Schéma 116:** Un mètre dynamique; l'ensemble du système de contrôle numérique du mètre améliore l'exactitude générale du système en éliminant des dérives de gain et de décalage inhérentes à l'électronique analogique (ZLS Corporation)

Certains ont des écrans pour observer les données recueillies sous forme numérique ou analogique; d'autres ont des ports pour imprimer des copies papier des données. La plupart ont des panneaux d'accès amovibles. Des piles peuvent être fournies pour faire fonctionner le système. Certains systèmes ont des ordinateurs et des logiciels intégrés. Certains gravimètres sont construits pour être abaissés par un câble jusqu'au sol et commandés à partir d'un hélicoptère. D'autres sont construits pour être descendus au fond de la mer par un navire ou un sous-marin.

**Aspect (à l'emballage):** Comme les systèmes sont très sensibles et coûteux, ils sont emballés et expédiés dans des contenants rigides, qui comprennent du plastique formé, des billes de plastique, du papier bulle ou d'autres matériaux conçus pour les protéger des chocs. Les conteneurs d'expédition portent généralement des étiquettes d'avertissement telles que "fragile", "manipuler avec précaution" ou "instruments sensibles".

12.A.4. Équipement de télémétrie et de télécommande, y compris l'équipement au sol, conçu ou modifié pour les systèmes visés par les articles 1.A, 19.A.1. et 19.A.2.

**Notes:**

1. L'article 12.A.4. ne vise pas l'équipement conçu ou modifié pour des avions pilotés ou des satellites. L'article 2.12.A.4. ne vise pas l'équipement au sol conçu ou modifié pour des applications terrestres ou marines.

L'article 3.12.A.4. ne vise pas l'équipement conçu pour des services GNSS commerciaux, civils ou de «sauvegarde de la vie humaine» (par exemple intégrité des données, sécurité des vols).

- Chine
- France
- Inde
- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

Production commerciale globale



**Nature et But:** L'équipement de télémétrie comprend des capteurs, des émetteurs et des récepteurs qui envoient au sol des informations en vol sur les performances des fusées ou des UAV. Ces dispositifs permettent aux ingénieurs de surveiller le vol et les performances d'un véhicule et de déterminer les causes de toute défaillance. Ces équipements sont largement utilisés lors des essais en vol de fusées et d'UAV. Pendant les essais en vol, la télémétrie est normalement recueillie pendant toute la durée du vol. L'équipement de télécontrôle qui utilise divers capteurs, récepteurs et émetteurs peut être utilisé pour commander à distance des fusées ou des UAV en vol motorisé. Cependant, de nombreux missiles balistiques et missiles de croisière opérationnels volent de manière autonome (c'est-à-dire sans aucun contrôle à distance).

**Mode de fonctionnement:** Les équipements de télémétrie installés dans les fusées et les drones de développement surveillent les

paramètres de vol importants (accélération, vibrations, réglages des gouvernes, pressions, températures, débits, positions des vannes, puissance/tension, etc. Le récepteur décode les données, les affiche et



les enregistre pour lecture et analyse ultérieure. La plupart des opérations se déroulent à l'intérieur d'un bâtiment avec une connexion d'antenne externe. Si elle est à cardan, cette antenne peut pivoter selon trois axes pour suivre le système de fusée ou l'UAV en vol. De nombreuses stations au sol, fixes ou mobiles, peuvent être nécessaires le long de la trajectoire de vol.

Les systèmes de télécontrôle typiques sont différents pour les systèmes de fusée et d'UAV. Les fusées utilisant le guidage de commande sont généralement suivies par radar près du site de lancement. Les données de trajectoire de vol sont traitées pour comparer la trajectoire réelle et la trajectoire souhaitée. En cas d'écart, les commandes de direction sont envoyées par radio de la station à un récepteur dans le système de fusée, qui met en

œuvre les commandes pour le mettre sur la bonne voie. Cette boucle de commande est maintenue jusqu'à ce que les moteurs soient arrêtés; le reste du vol est balistique, sauf si le missile utilise des gouvernes aérodynamiques. Le télécontrôle pour les systèmes d'UAV est souvent mis en œuvre par un concept "d'homme dans le circuit". Un capteur (tel qu'un téléviseur) dans l'UAV transmet une image visuelle à la station de contrôle au sol. Un pilote humain voit cette image et envoie des commandes de direction au véhicule par l'intermédiaire de la liaison de données.



**Schéma 117: Quelques émetteurs de télémessure sont conçus pour résister à des environnements rudes exigeant un boîtier compact et robuste (AMP)**



**Schéma 118: Un grand système d'antenne de télémétrie conçu pour les véhicules aériens sans pilote et les centres d'essai de vol (Antenne de Chelton)**

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La télémessure est importante pour la vérification des performances pendant les essais en vol des fusées et des UAV. Sans ces données, les essais en vol peuvent être longs et coûteux et nécessiter beaucoup plus d'essais en vol. Le télécontrôle est fréquemment utilisé pour les applications d'UAV. Le télécontrôle est rarement utilisé dans les missiles balistiques ou de croisière opérationnels qui transportent des armes parce que la liaison de données est vulnérable aux brouillages ou aux perturbations.

**Autres usages:** Des équipements de télémessure similaires sont utilisés pour tester les avions commerciaux et militaires. Il est également utilisé dans l'industrie pour recueillir des données auprès de sites éloignés et d'usines chimiques ou d'autres usines qui présentent un environnement dangereux. Il est également utilisé dans les véhicules terrestres robotisés qui doivent fonctionner dans des environnements dangereux.

**Aspect (sortie d'usine):**  
L'équipement de télémessure installé

sur des véhicules de vol est contenu dans de petits boîtiers en métal avec alimentation, câblage, et raccords d'antenne, et dispose de peu de dispositifs distinctifs (Figure 117). L'équipement de télémessure le plus important au sol est l'antenne de réception de télémessure. Il s'agit souvent d'une grande parabole qui peut pivoter sur deux dimensions Figure 118 ((elle peut parfois atteindre jusqu'à 18 m (60 pieds) montée sur une tour en acier haute de 11,5 m (38 pieds))). L'équipement électronique utilisé sur le site au sol pour démoduler, lire, enregistrer, interpréter, et afficher les télémessures ressemble à la plupart des équipements ou ordinateurs scientifiques montés en rack avec peu de caractéristiques permettant de les distinguer.



**Schéma 119: Une grande antenne militaire SATCOM conçue pour des postes de grand commandement et postes de commandement mobiles et convenant aux communications avec les véhicules aériens sans pilote. (General Dynamics)**

L'équipement de télécommande installé dans les véhicules aériens sans pilote permet la communication entre l'UAV et le poste de contrôle au sol. Tout comme le matériel de télémétrie, cet équipement est logé dans des boîtiers métalliques munis de connexions d'alimentation, de câbles et d'antennes, le tout sans apparence particulière. Certains UAV communiquent avec leurs stations de contrôle au sol au moyen de satellites et nécessitent des antennes SATCOM au sol spéciales. (Figure 119).

**Aspect (à l'emballage):** En raison de la sensibilité de l'électronique, le matériel de télémétrie est généralement expédié dans des conteneurs en carton rembourrés ou en bois. Certains contenants peuvent porter des étiquettes indiquant la nécessité d'une manipulation avec précautions. Habituellement, l'équipement est scellé en plastique pour protéger l'électronique de l'humidité et des décharges électrostatiques. Les grands ensembles d'équipements tels que les stations de télécontrôle intégrées seront démontés et expédiés dans des conteneurs séparés.

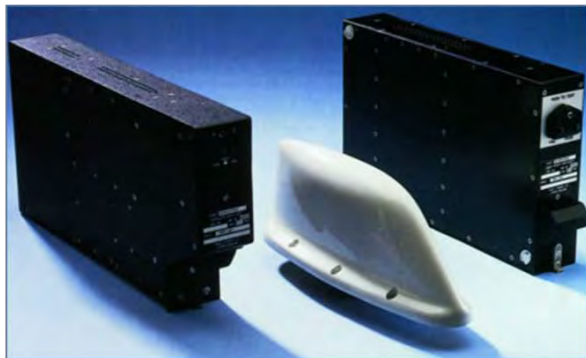


Schéma 120: *En haut à gauche:* Une antenne de SATCOM installée dans un véhicule aérien sans pilote (General Atomics Aeronautical). *En haut à droite:* Un émetteur-récepteur satellite commercial avec antenne profilée. (Racal Avionics). *Droite inférieure:* Une console de contrôleur de vol portable pour un véhicule aérien sans pilote (équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005)). *En bas à gauche:* Un système commercial avec antenne mécaniquement orientée (profilage non illustré). (Racal Avionics)





Schéma 121: Équipements de réception et de traitement des télémessures au sol représentatif. (In-Snec)

12.A.5. Systèmes de poursuite de précision utilisables pour les systèmes visés par les articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2. comme suit:

a. Systèmes de poursuite utilisant un décodeur embarqué sur la fusée ou le véhicule aérien sans pilote en liaison soit avec des références terrestres ou aéroportées, soit avec des systèmes de satellites de navigation, pour fournir des mesures en temps réel de la position et de la vitesse en vol;

b. Radars de télémétrie incluant des dispositifs de poursuite optiques/à infrarouges associés et présentant toutes les propriétés suivantes:

1. Résolution angulaire meilleure que 1,5 mrad;
2. Portée supérieure ou égale à 30 km, avec un pouvoir séparateur en portée meilleur que 10 m (valeur efficace); et
3. Pouvoir séparateur en vitesse meilleur que 3 m/s.

- |                  |                        |
|------------------|------------------------|
| • Chine          | • France               |
| • Allemagne      | • Israël               |
| • Inde           | • Japon                |
| • Pakistan       | • Fédération de Russie |
| • Afrique du Sud | • Suisse               |
| • Royaume Uni    | • États-Unis           |

Production globale



**Nature et But:** Les systèmes de suivi de précision produisent des enregistrements précis de la trajectoire du système de fusée ou de la trajectoire de vol du système d'UAV. Les ingénieurs utilisent ces données pour déterminer les performances du véhicule et les causes de toute défaillance du véhicule. Les ingénieurs en sécurité des champs de tir utilisent également ces données pour surveiller la trajectoire de vol du missile. Si le missile s'engage dans une trajectoire dangereuse, il est détruit. Les systèmes de poursuite de précision peuvent être utilisés en conjonction avec un équipement de télémétrie, ou comme alternative à celui-ci, qui renvoie des données sur le temps d'accélération du véhicule, à partir desquelles la trajectoire du missile peut être reconstruite.

**Mode de fonctionnement:** Des décodeurs installés sur une fusée ou un UAV traitent les signaux reçus d'émetteurs au sol ou par satellite. Ces signaux transportent des données de synchronisation qui permettent au décodeur de déterminer la distance à chaque émetteur. Ces données sont renvoyées à la station terrestre sur une fréquence de liaison descendante différente. Comme les émetteurs se trouvent à des endroits connus, la station au sol peut déterminer avec précision la position et la vitesse du missile. Ces données peuvent être affichées en temps réel ou enregistrées.

Les radars d'instrumentation de distance sont également utilisés pour déterminer la position et la vitesse des missiles. Habituellement, on utilise un radar à large champ de vision pour suivre l'emplacement approximatif du véhicule, qui est ensuite utilisé pour viser des radars à champ de vision étroit, des trackers optiques ou des trackers infrarouges capables de déterminer l'angle, la portée et la vitesse des missiles avec la précision requise. Ces données sont enregistrées au fur et à mesure qu'elles se produisent, et sont horodatées. Une variante de cette approche consiste à installer dans le véhicule volant un petit émetteur qui émet ou un transpondeur qui reçoit et réémet à la fréquence de fonctionnement du radar et fournit ainsi une balise qui permet au radar de suivre plus

facilement le véhicule.

Quelle que soit la façon dont les données sont recueillies, pour être utiles, les renseignements sur l'heure et la position doivent être interprétés. Le traitement des données après vol peut avoir lieu n'importe où, mais il est souvent effectué dans le centre de traitement des données de télémessure où les données en temps réel sont reçues et enregistrées. Ces données enregistrées sont lues, filtrées et traitées. Les données de suivi traitées sont ensuite réenregistrées sur disque ou sur bande pour une analyse plus poussée ou un tracé de sortie.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les systèmes de poursuite de précision et les radars d'instrumentation de distance sont utiles pendant la phase d'essai du programme de vol pour déterminer si le missile se déplace le long de la trajectoire prévue et pour surveiller le vol du missile afin de détecter toute anomalie. Ces informations sont utilisées pour évaluer et améliorer les performances de nombreux sous-systèmes. Le logiciel qui traite les données enregistrées après le vol et aide ainsi à déterminer la position du véhicule tout au long de la trajectoire de vol du missile est essentiel à l'interprétation de ces données de vol.



**Schéma 124:** Un radar mobile de poursuite de missile à réseau piloté en phase (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))



**Schéma 123:** Un système de poursuite de missile au laser mobile (Contraves)



**Schéma 122:** Un système de poursuite au laser électro-optique (BAE Systems)

**Autres usages:** Ces systèmes peuvent être utilisés pour appuyer les essais d'aéronefs commerciaux et militaires et la mise au point d'armes, y compris l'artillerie et les petites fusées. L'industrie utilise le post-traitement des données pour évaluer les événements après coup, comme la performance des voitures de course.

**Aspect (sortie d'usine)** Les systèmes de poursuite de précision et les radars d'instrumentation de télémessure ressemblent à des parties terrestres d'équipement de télémessure et de téléguidage. Il s'agit de radars familiers de type à diaphragme, comme le montrent les Figure 118 et Figure 119, ainsi que de radars à réseau phasé, qui se caractérisent par leur surface plate (plutôt que concave) (Figure 124). On utilise également des dispositifs optiques qui ressemblent à des télescopes, de grosses jumelles robotiques et des systèmes de poursuite laser qui ressemblent à des instruments optiques (Figure 122 & Figure 123).

Le matériel du système de suivi de précision (transpondeurs) embarqué à bord des fusées ou des UAV se compose généralement de très petits boîtiers électroniques dont la taille varie de 800 cm<sup>3</sup> à 2 500 cm<sup>3</sup>. Il s'agit généralement de boîtiers solides et étanches avec connecteurs d'alimentation et d'antenne externes. Le seul sous-élément de ces transpondeurs est l'antenne, qui est normalement située sur la surface externe de la fusée ou de l'UAV.

**Aspect (à l'emballage):** En raison de sa sensibilité aux chocs, l'équipement électronique est généralement expédié dans des conteneurs rembourrés. Certains peuvent avoir des étiquettes indiquant la nécessité d'une manipulation précautionneuse. Cet équipement est généralement scellé dans du plastique pour le protéger de l'humidité et des décharges électrostatiques. Les plus gros radars, les suiveurs optiques et les laser trackers sont expédiés démontés dans des caisses en bois et assemblés sur place et toutes les optiques sont protégées par des enveloppes de protection environnementales.

12.A.6. Piles thermiques spécialement conçues ou modifiées pour les systèmes spécifiés dans les articles 1.A., 19.A.1., ou 19.A.2.

**Note:**

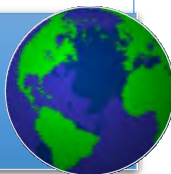
*L'article 12.A.6. ne vise pas les piles thermiques spécialement conçues pour les systèmes de fusées ou les véhicules aériens sans pilote n'ayant pas une portée d'au moins 300 km.*

**Notes techniques:**

*Les piles thermiques sont des piles à usage unique qui contiennent un sel solide inorganique nonconducteur servant d'électrolyte. Elles contiennent un matériau pyrolytique qui, lorsqu'il est en combustion, fait fondre l'électrolyte et active la pile*

- Chine
- France
- Allemagne
- Inde
- Israël
- Royaume Uni
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** La fonction correcte de la pile est un composant crucial pour répondre aux exigences de la mission des systèmes de livraison complets. Les piles thermiques, qui sont des sources d'énergie électrochimiques autonomes hermétiquement scellées, présentent différentes caractéristiques qui les rendent particulièrement résistantes à un environnement rude, et qui, en tant que telles, sont très bien adaptées pour satisfaire aux exigences de nombreuses exigences militaires. Ces caractéristiques comprennent: une capacité à rester en veille avec une longue durée de conservation supérieure à 20 ans, sans dégradation en terme de performance et en maintenant la capacité d'activer et de décharger leur puissance instantanément; des performances à des températures extrêmes (entre -65°F et +221°F); une forte densité de courant pour des applications de puissance élevée; une fiabilité élevée; et de faibles coûts d'entretien et de stockage.



Schéma 125: Une Pile thermique (ASB Group)

**Mode de fonctionnement:** Les piles thermiques se composent d'une série de cellules (connues sous le nom de cellules élémentaires), chacune ayant anode, électrolyte, cathode et masse de chauffage. L'électrolyte reste solide jusqu'à l'activation, et les cellules restent complètement inertes pendant le stockage des piles. Cette propriété de stockage inactivé présente le double avantage d'éviter la détérioration des matériaux actifs pendant le stockage, tout en éliminant en même temps la perte de capacité due à la décharge spontanée avant la mise en service de la pile.

Il existe deux types de conception de batterie thermique qui offrent des mécanismes différents pour l'activation de la batterie. On utilise une bande fusible le long du bord des pastilles de chaleur pour amorcer le chauffage de l'électrolyte. La bande de fusible est généralement allumée par un allumeur électrique par l'application d'un courant électrique à travers la bande de fusible.

La seconde conception utilise un trou central au milieu de la pile de la batterie dans lequel l'allumeur électrique à haute énergie déclenche un mélange de gaz chauds et de particules incandescentes. Cette dernière conception permet des temps d'activation beaucoup plus rapides (des dizaines de millisecondes contre des centaines de millisecondes pour la conception à bande). L'activation de la batterie peut également être réalisée par un amorceur à percussion, similaire à celui utilisé pour les munitions d'armes légères.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les batteries thermiques sont utilisées dans des applications qui nécessitent la fourniture immédiate d'une puissance élevée, telles que l'alimentation électrique des systèmes d'activation électrique des lanceurs spatiaux et des missiles, l'alimentation des systèmes de guidage électronique des missiles ou des systèmes de défense aérienne et de télémétrie. Ils sont la principale source d'énergie électrique pour toute une gamme de missiles et d'armes nucléaires. Les besoins croissants en électricité de ces systèmes en raison de l'augmentation de la fonctionnalité électronique dans les missiles modernes et perfectionnés augmenteront la demande de piles thermiques dans ce type d'applications.



Schéma 126: Diverses piles thermiques conçus pour différentes applications militaires. (HBL Power Systems)

**Autres usages:** Les piles thermiques ont une utilité dans une gamme d'autres applications, tant militaires que civiles. Ils fournissent de l'énergie électrique pour les mines et l'artillerie guidée, et sont également utilisés comme sources d'énergie à des fins industrielles (comme les plateformes de forage et les systèmes de surveillance). Ils peuvent également s'appliquer au marché des véhicules électriques. Le principal obstacle à l'utilisation généralisée des batteries thermiques en dehors d'applications militaires spécifiques est qu'elles ne sont pas économiquement viables. Presque toutes les batteries thermiques sont à usage unique et les batteries thermiques rechargeables sont très inefficaces (en raison des pertes d'énergie élevées dues à l'isolation thermique et du long temps de démarrage nécessaire pour atteindre une température de fonctionnement optimale).

**Aspect (sortie d'usine)** Les batteries thermiques sont fabriquées dans des boîtiers en acier hermétiquement scellés à la pression atmosphérique contenant soit de l'air sec, soit du gaz inerte de remplissage. Leur taille est relativement petite, allant d'environ 3,5 cm à 17,5 cm de largeur et de 6 cm à 22 cm de hauteur. Leur poids varie entre 200 g et 1.2 kg (Figure 126).

**Aspect (à l'emballage):** Les batteries thermiques sont expédiées dans des caisses en métal ou en plastique ou dans des boîtes en carton rembourrées.

## 12.B. Équipement d'essai et de production

Aucune.

## 12.C. Matériaux

Aucune.



## 12.D. Logiciel

### 12.D.1. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié pour «l'utilisation» de l'équipement spécifié à l'article 12.A.1.

- Argentine
- Brésil
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Corée du Nord
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Ukraine
- États-Unis
- Biélorussie
- Canada
- France
- Iran
- Italie
- Pakistan
- Afrique du Sud
- Suède
- Royaume Uni

Production globale



**Nature et But:** Le logiciel de soutien au sol et de vérification des missiles est utilisé pour surveiller l'état de préparation de la fusée ou de l'UAV avant le lancement. Ce logiciel est installé sur une ou plusieurs pièces d'équipement de soutien au sol et peut être adapté pour surveiller un seul sous-système de missile, comme le système de guidage. Souvent, ce logiciel contient les codes sécurisés qui empêchent les personnes non autorisées de lancer le missile sans les pièces d'identité appropriées, ainsi que le code qui déclenche le lancement et surveille le compte à rebours jusqu'au premier démarrage.

**Mode de fonctionnement:** Les logiciels de support au sol et de contrôle sont chargés dans l'équipement de fusée ou de support au sol des véhicules aériens sans pilote. Ces logiciels contrôlent le matériel au sol qui est électriquement raccordé à la fusée ou au véhicule aérien sans pilote par diverses liaisons ombilicales pour collecter les

signaux d'état du missile. À réception d'un ordre de lancement, le logiciel peut contenir des codes qui authentifient l'ordre de lancement, et s'il est correct, il initie et surveille la séquence de lancement du missile ou du véhicule aérien sans pilote. S'il est correctement conçu, le logiciel fournit à l'opérateur le statut du compte à rebours de lancement qui est utile si le système fonctionne mal et si le lancement échoue avant l'allumage du premier étage. L'analyse technique des indications de système permet le rétablissement rapide et une nouvelle tentative de lancement.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ce logiciel est utilisé pour surveiller les systèmes de missiles avant leur lancement. D'autres versions peuvent être utilisées pour lancer et surveiller le lancement jusqu'à l'allumage du premier étage.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, les logiciels de support au sol et de contrôle se présentent sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

12.D.2. «Logiciel» traitant les informations enregistrées après le vol, permettant de reconstituer toute la trajectoire du véhicule, spécialement conçu ou modifié pour les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2.

- Biélorussie
- France
- Israël
- Pakistan
- Fédération de Russie
- États-Unis
- Chine
- Inde
- Italie
- Suède
- Royaume Uni

Production globale



**Nature et But:** Le traitement des données après vol peut avoir lieu n'importe où, mais il est souvent effectué dans le centre de traitement des données de télémétrie où les données en temps réel sont reçues et enregistrées. Ces données enregistrées sont lues, filtrées et traitées. Les données de suivi traitées sont ensuite réenregistrées sur disque ou sur bande ou tout autre média pour une analyse plus poussée ou un tracé de sortie.

Le logiciel de traitement des données après vol et des données enregistrées consiste généralement en des routines de filtrage mathématique qui traitent les données précédemment enregistrées afin de fournir

une évaluation progressive de la trajectoire du véhicule. Ce logiciel de traitement est utilisé à la fois pour fournir les données estimées de la position du véhicule pendant les périodes où une panne de données en temps réel a pu se produire et pour effectuer un filtrage afin d'obtenir la meilleure estimation de la trajectoire. De nombreux types de mise en application de filtres mathématiques sont utilisés, allant des plus simples, comme l'interpolation en ligne droite entre les points de données, aux plus sophistiqués, comme le filtrage par ajustement spline, basé sur les polynômes. Certaines routines de filtrage utilisent également le filtrage de Kalman pour post-traiter ces données, bien que le filtrage de Kalman soit normalement utilisé pour les applications de suivi en temps réel en raison de sa capacité à utiliser des manipulations matricielles simplifiées pour arriver à des solutions de suivi.

**Mode de fonctionnement:** Les installations d'essais en vol transmettent les données de vol et les données de suivi de distance à une installation centrale de traitement. L'installation de traitement contient des ordinateurs à haute vitesse qui convertissent ces données et, dans certains cas, combinent les données individuelles des capteurs au sol et des instruments de vol télémétrés à partir de la fusée ou de l'UAV pour synthétiser l'information sur le rendement.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les données d'essais en vol sont utilisées pour appuyer l'évaluation de la performance et de la précision des systèmes de fusées. Elles sont également utilisées pour évaluer les performances de vol des UAV.

**Autres usages:** L'équipement utilisé pour appuyer les évaluations des essais en vol des fusées et des drones sert également à évaluer les performances des avions-civils et militaires.

**Aspect (sortie d'usine)** En règle générale, les logiciels qui traitent l'information enregistrée après le vol d'un missile et utilisée pour déterminer la trajectoire de vol d'essai prennent la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

12.D.3. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié aux fins de l'«utilisation» de l'équipement spécifié dans les articles 12.A.4., ou 12.A.5., utilisable pour les systèmes mentionnés aux articles 1.A., 19.A.1. ou 19.A.2.

- Australie
- Canada
- France
- Inde
- Italie
- Pakistan
- Suède
- Ukraine
- États-Unis
- Biélorussie
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Fédération de Russie
- Suisse
- Royaume Uni

Production globale



**Nature et But:** Le logiciel décrit dans cette section est utilisé pour recueillir des données de vol qui sont diffusées aux stations au sol (télémessure) pour analyse.

**Mode de fonctionnement:** Ce logiciel est utilisé pour recueillir des informations sur le système de vol et les performances (généralement à partir de l'ordinateur de vol) et pour compresser et moduler les données en un flux de données qui est ensuite diffusé aux récepteurs au sol. D'autres logiciels dans ces stations au sol prennent le flux de données reçues, décompressent les données et les convertissent en données de performance. Les ingénieurs du système analysent ensuite l'information pour évaluer les performances du système.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ce logiciel est uniquement conçu pour collecter, traiter et afficher des informations sur les performances de vol des fusées ou des UAV que les ingénieurs analysent pour déterminer les performances du système. Il est essentiel à l'évaluation des essais en vol de fusées ou d'UAV.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, les logiciels qui recueillent et traitent la télémessure des missiles prennent la forme d'un programme informatique stocké sur des supports imprimés magnétiques, optiques ou autres. Tous les supports courants, y compris les bandes magnétiques, les disquettes, les disques durs amovibles, les disques compacts, les lecteurs flash USB et les documents, peuvent contenir ce logiciel et ces données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique ou internet.

## 12.E. Technologie

12.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de «logiciels» mentionnés aux articles 12.A. ou 12.D.

**Nature et But:** La technologie de soutien au lancement comprend les connaissances ou les données nécessaires au développement et à l'exploitation de l'équipement de soutien au lancement et de ses logiciels connexes. L'objectif de la technologie d'appui au lancement est d'établir ou d'améliorer le développement, la production et l'utilisation de l'équipement d'appui au lancement et de vérification, et de contrôler (lancer ou refuser) et de surveiller les lancements de fusées ou d'UAV. La technologie, dans cette section, comprend les connaissances nécessaires pour faire fonctionner et développer l'équipement de soutien au lancement et les logiciels connexes, ainsi que la capacité de comprendre les données de télémétrie qui sont produites.

**Mode de fonctionnement:** La technologie de support de lancement est disponible sous plusieurs formes. Elle peut consister en une formation dispensée par une personne ou une organisation expérimentée dans le développement de systèmes de contrôle au sol et de systèmes de vérification ou de télémétrie pour fusées ou UAV qui fait office de formateur dans une classe sur ou à proximité du site de production ou du développement. Un pays peut recevoir une assistance technique pour la conception et le développement d'équipements d'appui au sol ou de télémétrie par le biais d'une formation fournie par ou dans un autre pays. Tous les manuels et matériels reçus pendant la formation peuvent être considérés comme des données techniques. Un pays peut également recevoir une assistance pour l'achat de l'équipement technique, des machines ou des matériaux nécessaires, soit en fournissant les articles, soit sous la forme de conseils sur le type d'équipement à acheter.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cette technologie sert principalement à mettre au point, à produire et à utiliser des logiciels de support et de vérification au sol des missiles, des logiciels de contrôle et de surveillance du lancement, du matériel de support au lancement utilisant ces logiciels et à recueillir, transmettre, recevoir et traiter des données sur le rendement des missiles au moyen de matériel de télémétrie et de logiciels de support.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

## Catégorie II - Article 13: Ordinateurs

## Catégorie II - Article 13: Ordinateurs

## 13.A. Équipement, assemblages et composants

13.A.1. Calculateurs analogiques, calculateurs numériques ou analyseurs différentiels numériques, conçus ou modifiés pour être utilisés dans les systèmes visés à l'article 1.A, présentant l'une des caractéristiques suivantes:

- a. Prévus pour fonctionner de façon continue à des températures allant de moins de -45 °C à plus de +55 °C; ou
- b. Conçus selon des critères de robustesse ou «résistant aux rayonnements».

**Note:**

«L'équipement» de l'article 13 peut être exporté en tant qu'élément d'un appareil ou satellite piloté ou en quantités appropriées pour des pièces de rechange pour un appareil piloté.

- Canada
- France
- Inde
- Italie
- Corée du Nord
- Afrique du sud
- Suède
- Ukraine
- États-Unis
- Chine
- Allemagne
- Israël
- Japon
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Taïwan
- Royaume Uni

Production  
globale



**Nature et But:** Les systèmes complets de fusée et les UAV contrôlés en 1.A. utilisent au moins un ordinateur, principalement dans l'ensemble de guidage, le système intégré d'instruments de vol ou le système intégré de navigation. Le calculateur de guidage calcule la vitesse et la position du missile à partir des capteurs embarqués, en utilisant les données recueillies pour les comparer à la trajectoire de vol et à la trajectoire du missile définies, et en envoyant des commandes de pilotage pour corriger toute erreur détectée. Les ordinateurs peuvent également fournir des références temporelles pour le missile et donner des ordres de coupure au système de propulsion et des ordres d'armement à la charge utile de l'arme aux heures de vol appropriées. Les ordinateurs de mission peuvent également être utilisés pour stocker et exécuter des profils de vol préprogrammés.

**Mode de fonctionnement:** Les ordinateurs de bord analogues ou numériques intègrent rapidement les équations de mouvement pour le vol de missiles et calculent l'amplitude et la durée des commandes nécessaires pour maintenir la trajectoire de vol du missile. Les ordinateurs reçoivent les signaux électriques des capteurs embarqués, effectuent les calculs appropriés et envoient des signaux de commande aux divers systèmes de missiles pour essayer de faire correspondre la trajectoire de vol préprogrammée. Ces systèmes informatiques sont généralement alimentés par des batteries (généralement 28 V) et utilisent des câbles de connexion pour l'interface avec les capteurs et les systèmes de contrôle.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La plupart des systèmes complets de fusées et UAV (y compris les missiles de croisière) possèdent au moins un ordinateur numérique robuste pour les calculs de navigation et de contrôle et l'intégration numérique des données des unités de mesure inertielle (IMU). Bon nombre d'entre eux utilisent également des ordinateurs analogues pour assurer le contrôle en boucle fermée des servos analogiques pour les



cardans IMU et pour la stabilisation des gouvernes des commandes de vol. L'ordinateur doit être capable de fonctionner aux températures extrêmes auxquelles sont soumis les missiles balistiques traversant l'espace, les drones haute altitude à longue endurance (HALE) ou les missiles de croisière transportés sur des pylônes externes à haute altitude. Les missiles doivent être équipés d'ordinateurs robustes pour résister aux vibrations et aux chocs d'un vol de missiles, et les missiles conçus pour survivre et fonctionner dans des environnements nucléaires doivent être équipés d'ordinateurs résistants aux rayonnements.

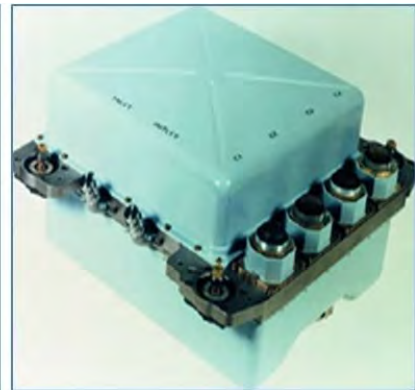
**Autres usages:** Les ordinateurs durcis ont plusieurs applications militaires et commerciales. La plupart des avions militaires et civils, des missiles tactiques et des engins spatiaux nécessitent des ordinateurs robustes qui fonctionnent dans les limites des températures extrêmes définies dans l'annexe du MTCR. Les engins spatiaux à longue durée de vie et les satellites stationnés à l'intérieur ou à proximité des ceintures de rayonnement ont également des exigences en matière de résistance au rayonnement, mais ces exigences peuvent être légèrement inférieures aux spécifications figurant en annexe.



**Schéma 127:** Un ordinateur de mission pour les plateformes multiples. Sa dimension compacte est idéale pour l'espace confiné sur quelques UAV. (Curtiss Wright Embedded Computing Controls)



**Schéma 128:** Un autre ordinateur de mission pour des plateformes multiples, celle-ci est conçue pour usage dans des applications aérospatiales et militaires difficiles. (Curtiss Wright Embedded Computing Controls)



**Schéma 129:** Un ensemble électronique résistant au rayonnement avec refroidissement par liquide. (The Charles Stark Draper Laboratory, Inc.)

**Aspect (sortie d'usine):** Les ordinateurs configurés pour les missiles et les UAV sont généralement logés dans des boîtiers métalliques avec dissipateurs de chaleur intégrés pour évacuer la chaleur produite par des vitesses de fonctionnement élevées. Ils sont également de taille compacte et conçus pour s'intégrer dans des environnements à espace restreint. Deux exemples d'ordinateurs multimissions robustes conçus pour des applications aérospatiales et militaires sont illustrés aux Figure 127 et Figure 128. Au sein de ces assemblages se trouvent une grande variété de pièces électroniques qui peuvent sembler similaires à celles qui sont largement utilisées dans les applications commerciales.

Une caractéristique distinctive (bien qu'elle ne soit pas propre à l'usage militaire) consiste en des composants métalliques et céramiques hermétiquement scellés, contrairement aux composants plastiques plus courants que l'on trouve dans l'électronique commerciale (Figure 129). Les interfaces de câbles sont équipées de connecteurs circulaires robustes ou de petits connecteurs à vis avec des câbles blindés. L'électronique se trouve généralement à l'intérieur d'une cage de Faraday à radiofréquence (RF) extérieure, qui peut être hermétiquement fermée ou ventilée à la pression ambiante. Les vaisseaux pressurisés sont utilisés pour aider à acheminer la chaleur vers le boîtier et à monter le dissipateur thermique des missiles et des UAV, qui fonctionnent à haute altitude. Pour les applications nécessitant des assemblages légers, les ordinateurs peuvent être emballés dans des conteneurs en plastique robuste avec des revêtements métalliques à l'intérieur des couvercles en plastique pour la protection contre les RF.

**Aspect (à l'emballage):** Les ensembles et pièces d'ordinateurs électroniques pèsent généralement moins de 25 kg. Ils sont emballés dans des sacs en plastique, placés à l'intérieur de boîtes en carton et emballés dans de la mousse de caoutchouc ou un film à bulles pour les protéger contre les chocs; les étiquettes des boîtes indiquent généralement que le contenu est électrostatique et sensible. Les unités plus grandes intégrées dans un système plus grand et pesant plus de 25 kg peuvent être emballées dans des boîtes en métal ou en bois.

### 13.B. Équipement d'essai et de production

Aucune.

### 13.C. Matériaux

Aucune.

### 13.D. Logiciel

Aucune.

## 13.E. Technologie

13.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement»,

**Nature et But:** La technologie décrite dans cette section porte sur la mise au point, la production et l'utilisation nécessaires d'ordinateurs robustes dans les systèmes de fusées et d'UAV, y compris les missiles de croisière.

**Mode de fonctionnement:** L'assistance technique est disponible sous plusieurs formes. L'assistance technique peut consister en un enseignement dans une salle de classe sur le site de développement ou de production ou à proximité, dispensé par une personne ou une organisation expérimentée dans le développement d'ordinateurs robustes pour systèmes spatiaux ou UAV. Un pays peut recevoir cette assistance technique d'une ou plusieurs entités étrangères qui possèdent les installations nécessaires pour fournir une expérience pratique de la conception et du développement de la technologie souhaitée. L'assistance peut également comprendre des conseils sur les pièces ou composants à se procurer ou de l'aide pour se les procurer.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La technologie incluse dans cette section est utilisée pour fournir des ordinateurs numériques ou analogiques conçus pour fonctionner dans un système de fusée ou d'UAV afin de compléter les calculs de navigation et de contrôle et l'intégration numérique des données IMU. Les systèmes de fusées et les UAV utilisent également des ordinateurs analogiques pour assurer le contrôle en boucle fermée des servos analogiques pour les cardans des IMU et pour la stabilisation des gouvernes de vol.

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

Catégorie II - Article 14:  
Convertisseurs analogiques-  
numériques

## Catégorie II - Article 14: Convertisseurs analogiques-numériques

## 14.A. Équipement, assemblages et composants

14.A.1. Convertisseurs analogique-numérique, utilisables dans les systèmes visés à l'article 1.A, ayant l'une des caractéristiques suivantes:

- a. Conçus pour respecter les spécifications militaires relatives aux équipements renforcés; ou
- b. Conçus ou modifiés pour une utilisation militaire et possédant l'une des caractéristiques suivantes:
  1. Microcircuits de conversion analogique-numérique résistant aux rayonnements ou ayant toutes les caractéristiques suivantes:
    - a. Prévu pour fonctionner à des températures inférieures à -54 °C et supérieures à +125 °C, et
    - b. Fermés hermétiquement; ou
  2. Cartes de circuits imprimés ou modules pour convertisseurs analogique numérique de type à alimentation électrique, ayant toutes les caractéristiques suivantes:
    - a. Prévu pour fonctionner à des températures inférieures à -54 °C et supérieures à +80°C, et
    - b. Comportant des «microcircuits» visés par l'article 14.A.1.b.1.

- |                        |              |
|------------------------|--------------|
| • France               | • Allemagne  |
| • Israël               | • Japon      |
| • Fédération de Russie | • Suède      |
| • Royaume Uni          | • États-Unis |

Production globale



**Nature et But:** Les convertisseurs analogique-numérique (CDA) sont des dispositifs électroniques permettant de convertir un signal analogique, qui est une tension variant continuellement, en un signal numérique, qui consiste en des tensions discrètes représentant un motif de "1s" et "0s" (données binaires). Ces convertisseurs permettent aux sorties analogiques de divers dispositifs tels que capteurs, accéléromètres et gyroscopes d'être traitées par des dispositifs numériques, tels que les processeurs de signaux numériques (DSP) et les ordinateurs.

**Mode de fonctionnement:** Dans sa forme la plus simple, un ADC est un voltmètre dont la sortie est un "mot" binaire. Plus le mot est long (c'est-à-dire plus il y a de "bits" par mot),

plus la tension d'entrée peut être représentée avec précision. Par exemple, un mot de 8 bits représentant une plage de tension de zéro à un volt fournit 256 valeurs discrètes. Avec un mot assigné à zéro, on obtient 255 incréments d'un peu plus de 3,92 mV chacun. Des incréments de 3,92 mV limitent la précision théorique à plus ou moins 1,96 mV ou 0,196%. Une autre caractéristique importante de l'ADC concerne le taux de conversion, qui est une mesure de la vitesse à laquelle l'appareil peut mettre à jour le mot de sortie pour refléter les changements rapides de la tension d'entrée. Un taux de conversion plus rapide permet à l'ADC de traiter des signaux d'entrée ayant un contenu en fréquence plus élevé. Les fabricants utilisent l'une des différentes approches de conception de circuits (c.-à-d. conversion directe, intégration, codage delta, sigma-delta et autres) pour effectuer la conversion.

La plupart des CDA sont conçus pour avoir une relation entrée-sortie linéaire. Cependant, dans des schémas plus élaborés, les tensions d'entrée sont mappées à des valeurs numériques en fonction des données d'étalonnage précédemment prélevées sur l'instrument analogique auquel l'ADC est couplé. Ce mappage permet à l'ADC de compenser les non-linéarités de la mesure analogique.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Tout missile utilisant un ordinateur numérique nécessite un CDA. Les CDA doivent fonctionner dans la plage de températures spécifiée ci-dessus et être hermétiquement scellés si, comme la plupart des missiles balistiques, ils sont pilotés dans l'exo-atmosphère.

**Autres usages:** Les CDA sont largement utilisés, avec des pièces robustes communes à tous les avions, les systèmes d'allumage électronique automobile et les capteurs moteur. D'autres applications commerciales comprennent une variété de systèmes de capteurs, de caméras électroniques, de systèmes d'imagerie médicale et de radios. Les engins spatiaux et les satellites stationnés à l'intérieur ou à proximité des ceintures de radiation ont besoin de CDA plus

résistants au rayonnement, qui fonctionnent à des températures extrêmes indiquées. Bien que certaines exigences relatives aux applications spatiales (dose totale d'environ 100 krad (Si)) soient environ cinq fois inférieures aux spécifications de l'annexe, ces systèmes utilisent souvent des CDA contrôlés par MTCR.

**Aspect (sortie d'usine)** Les composants CDA militaires sont des boîtiers métalliques hermétiquement scellés afin d'assurer leur fonctionnement dans des environnements hostiles et de dissiper la chaleur associée au traitement à haut débit des données provenant des capteurs. L'aluminium est le métal principal utilisé pour les cadres, les structures et les dissipateurs de chaleur des panneaux de CDA. Les assemblages peuvent varier de quelques centimètres à environ 0,3 m ou plus sur un côté et peser de 100 g à 25 kg. Leur densité d'emballage est près du tiers de celle de l'aluminium.

Les ensembles CDA intégrés se composent d'une grande variété de composants électroniques qui ne se distinguent pas facilement de ceux utilisés dans les applications commerciales. Ils peuvent être dotés de composants discrets et ressembler à d'autres appareils électroniques militaires (Figure 131). Les CDA discrets militaires et commerciaux ne diffèrent extérieurement qu'en partie par leur nombre. Les CDA durcis par irradiation sont souvent emballés sur une seule carte de circuit intégré (CI), idéale pour une utilisation dans les missiles balistiques. Ces appareils ont des caractéristiques de conception spéciales qui les rendent robustes et résistants aux chocs et aux vibrations. Bien que les cartes de circuit CDA soient similaires à celles des DSP, elles comprennent des circuits supplémentaires pour les amplificateurs tampons, le multiplexage ou le conditionnement du signal (filtres, limitation de tension, etc.). Par conséquent, une plus grande partie de la carte de circuit CDA est constituée de composants discrets (résistances, condensateurs, diodes,



Schéma 130: Un convertisseur analogique-numérique utilisé principalement dans l'analyse de signal radar (Datel)

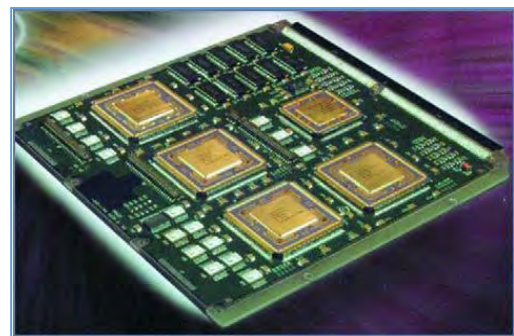


Schéma 131: Panneau de processeur de convertisseur analogique-numérique/signal numérique (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))



etc.) Les cartes de circuit imprimé sont en fibre de verre époxy avec dissipateurs et traces thermiques en cuivre. Les pièces électroniques sont dans des boîtiers métalliques spéciaux (principalement en cuivre-nickel) avec des fils de liaison en aluminium ou en or et des substrats en silicium.

**Aspect (à l'emballage):** Les cartes de circuits imprimés et modules CDA pèsent moins de 25 kg. Ils sont emballés dans des sacs en plastique marqués pour indiquer qu'il s'agit d'appareils électrostatiques sensibles, et ils sont emballés dans de la mousse de caoutchouc ou un film à bulles pour la protection contre les chocs dans des boîtes en carton.

### 14.B. Équipement d'essai et de production

Aucune.

### 14.C. Matériaux

Aucune.

### 14.D. Logiciel

Aucune.

## 14.E. Technologie

14.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements mentionnés à l'article 14.A.

**Nature et But:** La "technologie" décrite à l'article 14 constitue les connaissances et l'expérience nécessaires au développement, à la production et à l'utilisation de convertisseurs analogique-numérique (CDA) robustes dans les systèmes de fusées et de véhicules aériens sans pilote, notamment les missiles de croisière. Les plans, les schémas et les dessins techniques font partie des données techniques de cette technologie.

**Mode de fonctionnement:** Les CDA sont toujours intégrés dans les cartes de circuits imprimés pour les applications de missiles. L'assistance technique requise à cette fin peut consister en des compétences telles que la conception de cartes de circuits imprimés, leur disposition, leur fabrication, leur conception et leur mise à l'essai. Un pays peut recevoir cette assistance technique d'une ou plusieurs entités étrangères qui possèdent les installations de conception et de développement nécessaires au développement de la technologie souhaitée. Un pays peut également recevoir une aide à la passation de marchés pour localiser et acheter des composants déterminants.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cette technologie permet de traiter les sorties analogiques de divers dispositifs tels que les capteurs, les accéléromètres et les gyroscopes à l'aide de dispositifs numériques, tels que les processeurs de signaux numériques et les ordinateurs de vol.

**Autres usages:** Les CDA sont largement utilisés dans les avions, les systèmes d'allumage et les capteurs de moteur. D'autres applications commerciales comprennent l'enregistrement musical, l'instrumentation, les caméras électroniques et l'équipement médical.

**Aspect (sortie d'usine):** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

## ARTICLE 15 - INSTALLATIONS D'ESSAI ET ÉQUIPEMENT

## Catégorie II - Article 15: Installations d'essai et équipement

## 15.A. Équipement, assemblages et composants

Aucune.

## 15.B. Équipement d'essai et de production

**Notes techniques:**

Dans l'article 15.B., «table nue» signifie une table ou surface plate, sans fixation ni raccord.

Équipement d'essai aux vibrations, utilisable pour les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2. ou les sous-systèmes visés aux articles 2.A. ou 20.A, et leurs composants, comme suit:

- a. Systèmes d'essais aux vibrations utilisant des techniques de rétroaction ou en boucle fermée et comportant une commande numérique, capable d'assurer la vibration d'un système à une accélération égale ou supérieure à 10 g efficaces (valeur efficace) entre 20 Hz et 2 kHz et communiquant des forces égales ou supérieures à 50 kN, mesurées «table nue»;
- b. Organes de commande numériques, associées avec des «logiciels» d'essais spécialement conçus, utilisant une bande passante en temps réel supérieure à 5 kHz et conçues pour être utilisées avec les systèmes d'essais aux vibrations visés à l'article 15.B.1.a;

**Notes techniques:**

Une «bande passante en temps réel» est définie comme le taux maximal auquel l'organe de commande peut exécuter des cycles complets d'échantillonnage, de traitement de données et de transmission de signaux de commande.

- c. Pots vibrants, avec ou sans amplificateurs associés, capables de communiquer une force égale ou supérieure à 50 kN, mesurée «table nue», utilisables dans les systèmes d'essais aux vibrations visés à l'article 15.B.1.a;
- d. Structures de support des pièces à tester et équipements électroniques conçus pour combiner plusieurs pots vibrants en un système vibrant complet capable de fournir une force combinée effective supérieure ou égale à 50 kN mesurée «table nue», et utilisables dans les systèmes d'essai aux vibrations visés à l'article 15.B.1.a.

**Notes techniques:**

Les systèmes d'essais aux vibrations comportant un contrôleur numérique sont les systèmes dont les fonctions sont partiellement ou entièrement contrôlées de façon automatique par des signaux électriques codés numériquement et stockés.

**Nature et But:** Les systèmes d'essais vibratoires de ce type sont de gros et puissants équipements pour simuler les vibrations et les chocs en vol des fusées, des véhicules aériens sans pilote (UAV) et de leurs charges utiles pendant le lancement, la séparation des étages et le vol normal. Les missiles et leurs sous-systèmes sont testés pour déterminer leurs modes élastiques, leurs fréquences et leur sensibilité aux vibrations et aux chocs. Cette information sert à améliorer la conception des missiles et à qualifier les systèmes, les sous-systèmes et les composants comme étant dignes de vol. Ils sont parfois utilisés dans les tests d'assurance qualité pour détecter les connexions défectueuses et les composants desserrés.



Schéma 132: Essai de vibration d'un système altimétrique laser (NASA)

Un système d'essai vibratoire typique comprend un vibreur, ou propulseur, pour faire vibrer les articles d'essai qui y sont fixés; un amplificateur de puissance ou une autre source d'énergie pour entraîner le vibreur; un contrôleur pour commander l'amplificateur de puissance en fonction de la fréquence et de l'amplitude des vibrations désirées; et un système de refroidissement par air ou liquide pour le vibreur et l'amplificateur.



Schéma 133: Un pot vibrant étant préparé pour un essai de vibration sur un missile. (Unholtz-Dickie)

**Mode de fonctionnement:** Les systèmes d'essai de vibration utilisent des propulseurs mécaniques qui fonctionnent habituellement selon un principe d'entraînement électromagnétique comme celui d'un haut-parleur audio, sauf qu'ils sont beaucoup plus gros et entraînent un élément d'essai massif plutôt qu'un cône d'enceinte délicat. Les contrôleurs numériques régulent des modèles de vibrations complexes avec un contenu en fréquence d'amplitude contrôlée dans la plage de 20 Hz à 2 000 Hz. Ces modèles sont conçus pour simuler les fréquences et amplitudes de vibration attendues pendant la mission, y compris la simulation d'éclats ou de chocs de vibration. La sortie de ces contrôleurs doit être grandement amplifiée pour piloter les propulseurs. Les systèmes de vibration hydrauliques et

pneumatiques, bien qu'ils soient capables d'effectuer des essais de vibration sur des éléments du MTCR, ne sont généralement pas en mesure de répondre aux spécifications de performance ci-dessus.

Les armatures de deux propulseurs ou plus peuvent être jointes avec une structure de support d'équipement d'essai pour obtenir les niveaux de vibration requis. Ces structures doivent être à la fois solides et légères. Les unités électroniques sont nécessaires pour contrôler plusieurs propulseurs de façon synchrone. Elles acceptent les commandes du contrôleur numérique et les relaient à de multiples amplificateurs, chacun pilotant l'un des propulseurs.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Toutes les fusées et tous les UAV sont soumis à des vibrations et des chocs pendant le transport et le vol. Si les vibrations et les chocs sont bien compris, les véhicules aériens peuvent être rendus plus résistants et plus légers parce que les marges de sécurité peuvent être réduites. L'utilisation de ces équipements permet également d'éviter des échecs coûteux en vol d'essai.

**Autres usages:** Les systèmes d'essai de vibration sont utilisés pour tester d'autres équipements et produits militaires et commerciaux tels que les pièces d'avion. Les essais de vibration sont effectués sur de nombreux autres biens de consommation, mais les systèmes d'essais de vibration contrôlés par le MTCR sont beaucoup plus puissants et coûteux que ceux nécessaires pour des applications moins exigeantes.

**Aspect (sortie d'usine)** Les systèmes d'essais de vibration contrôlés par le MTCR sont de grands appareils qui occupent une surface au sol d'environ 3 m x 3 m. Des détails sur les composants sont donnés ci-dessous.



**Schéma 134: Un premier étage de propulseur dans un banc d'essai de vibration (Krunichev Space Center)**

*Contrôleurs numériques et logiciel de test de vibration spécialement conçus:*

Le contrôleur numérique est approximativement de la même taille que l'unité centrale d'un ordinateur personnel (PC), 0,5 m de large x 0,5 m de profondeur x 0,25 m de haut. Dans certains cas, le contrôleur est un dispositif électronique suffisamment petit pour être monté en rack au-dessus de l'amplificateur de puissance. Dans d'autres cas, on utilise un ordinateur équipé de moniteurs et de cartes d'interface personnalisées pour la connexion à l'amplificateur de puissance. Les contrôleurs nécessitent un logiciel spécial de contrôle des vibrations. Les fabricants de systèmes d'essais de vibrations proposent désormais des logiciels sur PC qui intègrent les fonctions de contrôle des systèmes d'essais, d'enregistrement et d'analyse des données.

*Propulseurs (unités vibrantes):* Un propulseur commandé par le MTCR est généralement doté d'une base en fonte d'acier en forme de U très lourde avec des brides épaisses pour le fixer solidement au sol. Il mesure environ 1,3 m sur un côté et pèse plusieurs tonnes. Le corps de l'agitateur cylindrique ou en acier en forme de tambour, d'environ 1 m de longueur et de diamètre, est suspendu entre les côtés verticaux de la base. Ces côtés verticaux sont généralement munis de tourillons (pivots) qui permettent de faire pivoter le boîtier de l'agitateur pour modifier la direction de poussée. La Figure 132 montre un altimètre laser satellite soumis à un essai de vibration. La Figure 134 montre un amplificateur de noyau dans un banc d'essai de vibrations.

La partie du propulseur qui secoue l'objet à tester est une armature métallique ronde sortant d'une extrémité du boîtier du générateur de vibrations. L'armature est forée selon un motif de trous pour des boulons utilisés pour attacher l'article d'essai. Un diaphragme en caoutchouc entre la plaque d'armature et le corps de logement du pot vibrant est souvent employé pour sceller les fonctionnements intérieurs.

Le système de propulseur peut inclure une table à glissière accessoire (Figure 135), qui est souvent faite de magnésium pour minimiser le poids. Il supporte le poids de l'article à tester sur un film d'huile ou un palier à air au-dessus de la base de la table de glissement, qui est souvent faite de granit. Pour utiliser la table à glissement, le propulseur lui-même est pivoté sur ses tourillons jusqu'à ce que l'axe de mouvement de son armature soit horizontal. L'armature est ensuite fixée sur le côté



de la table de glissement afin de faire vibrer l'appareil testé sur l'un ou l'autre axe horizontal. Un tel ensemble de table de glissement a la même taille et le même poids que l'ensemble propulseur lui-même, et les deux peuvent être montés sur une base commune.

**Amplificateur de puissance:** L'amplificateur de puissance pour un système d'essai de vibration électrodynamique commandé par le MTCR occupe un ou plusieurs supports pleins (chacun mesurant 0,5 m de large x 0,75 m de profondeur x 2 m de haut) d'équipement électronique de commande de puissance. La puissance d'entrée électrique exigée pour conduire un tel système est d'environ 60 à 80 kilowatts. Le prélèvement de puissance est si

important qu'il doit être connecté à l'alimentation électrique du bâtiment; il ne peut pas utiliser un fil électrique et une prise standards.

**Refroidissement:** Puisque le pot vibrant et l'amplificateur dégagent environ la moitié de leur courant électrique d'entrée en chaleur, un refroidissement par air forcé ou par liquide réfrigérant circulant est exigé. Le ventilateur pour le refroidissement par air d'une installation type mesure 1,5 m x 0,5 m x 0,8 m et pèse de 200 à 250 kg. Le refroidissement par liquide fait circuler l'eau de refroidissement par le système d'essai et dans une tour de refroidissement ou un radiateur équipé de ventilateurs électriques. Chacun des systèmes de refroidissement par liquide est au moins aussi grand que le ventilateur de refroidissement par air. À l'inverse, un approvisionnement continu en eau du site peut simplement passer par le système de refroidissement et être vidangé.

- Chine
- Allemagne
- Fédération de Russie
- États-Unis
- France
- Pays-Bas
- Royaume Uni

Production globale



Les tendances récentes en matière d'essais vibratoires font de plus en plus appel à des systèmes basés sur PC, car ils offrent une flexibilité à faible coût. Étant donné que des cartes d'interface spécialisées de contrôle des systèmes vibrants sont installées dans les PC, il se peut que l'examen externe n'indique pas clairement que les PC sont contrôlés par le MTCR.

**Aspect (à l'emballage):** À part le contrôleur de système, qui a généralement la même taille qu'un PC et peut être emballé pour expédition dans un carton de PC typique, les composants d'un système d'essai de vibration du MTCR sont si grands et lourds qu'ils doivent être emballés dans des caisses en bois extrêmement robustes faites sur mesure.



Schéma 135: Un exemple d'un propulseur avec table à glissement. (Kingdom Pty Ltd)

**Structures de soutien:** Les structures de soutien d'équipement d'essai utilisées avec un tel équipement d'essai de vibration sont des ensembles faits sur commande, qui mesurent pas moins de 3 m x 3 m x 3 m ou plus, selon l'unité d'essai et pèsent pas moins de 5 à 10 tonnes. Les unités électroniques conçues pour combiner plusieurs propulseurs en un système de propulseur complet vont d'un ordinateur personnel (PC) ordinaire équipé de plusieurs cartes d'interface internes spéciales, chacune contrôlant un seul propulseur, à un ou plusieurs supports de matériel électronique fait sur mesure.

15.B.2: installations d'essais aérodynamiques" pour des vitesses de Mach 0,9 ou plus, utilisables pour les systèmes

les systèmes visés par les articles 1.A, ou 19.A. et dans les sous-systèmes visés par l'article 2.A. ou 20.A.

Note:

*L'article 15.B.2 ne vise pas les souffleries dont la vitesse est égale ou inférieure à Mach 3 et dont la dimension de la "section d'essai" est égale ou inférieure à 250 mm.*

Notes techniques:

1. Les «installations d'essais aérodynamiques» comprennent les souffleries et les tunnels de choc pour l'étude du flux d'air au-dessus des objets.

2. Par «dimension de la section transversale d'essai», on entend le diamètre du cercle, ou le côté du carré, ou le côté le plus long du rectangle, ou l'axe principal de l'ellipse au point le plus grand de la «section transversale d'essai». La section transversale d'essai est la section perpendiculaire à la direction de l'écoulement.

**Nature et But:** Les souffleries sont de grandes enceintes dans lesquelles de l'air circule ou est soufflé à travers une section d'essai contenant une réplique de la fusée ou de l'UAV, parfois en grandeur réelle mais souvent à l'échelle. Elles servent à mesurer les performances aérodynamiques de la cellule lors d'un vol simulé dans l'atmosphère. L'instrumentation de la section d'essai recueille des données sur la portance et la traînée du véhicule, la stabilité et le contrôle, la configuration des entrées et sorties d'échappement du moteur, les effets thermiques et la signature infrarouge. Les souffleries sont de type à écoulement continu ou à soufflage descendant (p. ex. tube à choc) et mesurent les paramètres aérodynamiques pour une longue ou une courte durée, respectivement. Certains tunnels à écoulement continu font circuler le même air autour, tandis que d'autres aspirent l'air frais à une extrémité et le rejettent dans l'atmosphère à l'autre extrémité.



**Schéma 136:** Une soufflerie hypersonique capable d'atteindre Mach 5 pour tester les conditions en vol pour des lanceurs (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd)

**Mode de fonctionnement:** Une soufflerie à écoulement continu utilise un ou plusieurs grands ventilateurs pour atteindre la vitesse d'air souhaitée dans la section d'essai. La section d'essai pourrait être appelée la gorge parce que le reste du tunnel possède une plus grande section transversale avec des vitesses d'air plus lentes, y compris à travers le ventilateur. Après la section d'essai, l'air ralentit à travers un diffuseur, puis circule de nouveau à travers le ventilateur pour créer un flux d'air continu à travers l'objet à tester.

Par ailleurs, certaines souffleries aspirent simplement l'air de l'atmosphère à une extrémité par un cône d'entrée, essentiellement un grand entonnoir rectangulaire, comme le montre la Figure 137. Dans une telle soufflerie "une fois passé", l'air s'échappe simplement dans l'atmosphère après avoir ralenti après avoir dépassé la section d'essai. Bien que ce dernier type de tunnel puisse avoir une conception droite et simplifiée pour un bon rapport coût-efficacité, il faut plus de puissance de ventilation pour amener continuellement l'air à la vitesse voulue à partir d'un point mort. Inversement, l'un des avantages des souffleries à circulation est que la masse d'air fermée continue de se déplacer, ce qui réduit les besoins en énergie.



**Schéma 137:** Une grande soufflerie construite à l'origine pour la circulation à travers la boucle des bâtiments en arrière-plan. Le cône d'entrée au premier plan a été ajouté pour permettre également un fonctionnement à passage unique avec les mêmes ventilateurs. (NASA)

Afin d'éviter d'avoir besoin d'un ventilateur extrêmement puissant pour atteindre les vitesses les plus élevées, une soufflerie à purge fonctionne de manière transitoire en mode à passage unique tout en évitant complètement les ventilateurs. L'air ou un autre gaz est stocké dans un grand réservoir à haute pression, puis libéré par une vanne de contrôle dans le tunnel et ensuite à travers la section d'essai et en dehors.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les souffleries capables de dépasser Mach 0,9 sont utilisées pour tester les fusées, les UAV supersoniques et les véhicules de rentrée. Pour le vol à grande vitesse, généralement au-dessus de Mach 3, des essais de transfert de chaleur peuvent être effectués. Des tunnels à haute enthalpie, des tunnels à écoulement continu, ou encore des tubes à choc, sont nécessaires pour produire des vitesses de vent supérieures à Mach 5 pour les essais de missiles balistiques à longue portée ou de véhicules hypersoniques (Figure 136).

**Autres usages:** Les souffleries sont utilisées dans la conception des avions pour toutes les gammes de vitesse, y compris les supersoniques.

**Aspect (sortie d'usine):** Une soufflerie pour l'essai de maquettes à petite échelle peut tenir entièrement dans une pièce d'un bâtiment. Sa section d'essai et les autres sections du tunnel peuvent être de section circulaire ou rectangulaire. Les souffleries pour tester les systèmes de fusée ou d'UAV de taille réelle sont plus le plus souvent de forme rectangulaire. Ces dernières sont de grandes installations comprenant plusieurs bâtiments abritant la section d'essai, des compresseurs (ventilateurs), des systèmes d'acquisition de données et des alimentations électriques (figure 6). Historiquement, les plus grandes souffleries pour les essais des avions n'ont jamais atteint des vitesses approchant Mach 0,9.

Une soufflerie à débit continu convenant à l'essai de missiles de grande taille mesure habituellement de 50 à 100 m de longueur et de 25 à 50 m de largeur, avec des diffuseurs (cônes en expansion progressive) de 10 à 15 m de diamètre. Une soufflerie de grande taille.

- Canada
- France
- Japon
- Pays Bas
- Suisse
- États-Unis
- Chine
- Allemagne
- Inde
- Fédération de Russie
- Royaume Uni

Production globale





**Schéma 138: Objets d'essai dans la section d'essai d'une soufflerie hypersonique (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))**

Une soufflerie à débit continu convenant à l'essai de missiles de grande taille mesure habituellement de 50 à 100 m de longueur et de 25 à 50 m de largeur, avec des diffuseurs (cônes en expansion progressive) de 10 à 15 m de diamètre. Une soufflerie de grande taille est généralement présentée dans un ovale horizontal 10 à 20 fois la longueur de la section d'essai et 5 à 10 fois sa largeur. Les sections tubulaires du tunnel sont généralement faites de plaques en acier soudées ensemble pour former le circuit, qui est soutenu de l'extérieur par des poutres d'acier en I. Certaines souffleries emploient des sections réglables de tuyère pour varier les caractéristiques du flux d'air.

Les sections d'essai ont généralement des portes d'accès pour que les objets d'essai puissent être déplacés à l'intérieur et à l'extérieur de la soufflerie et montés sur le

support d'essai. Généralement, la structure de support d'essai comprend des instruments de mesure des forces pour déterminer les forces aérodynamiques de portance et de traînée, ainsi que les moments de rotation (couples) subis par le modèle aérodynamique à l'essai. La section d'essai peut avoir des fenêtres pour l'observation de l'écoulement d'air supersonique autour du missile à l'aide de dispositifs d'enregistrement photographique Schlieren spéciaux (ou d'autres dispositifs non intrusifs de visualisation de l'écoulement). La section d'essai d'un grand tunnel comporte habituellement un bâtiment d'exploitation connexe qui abrite les commandes et l'instrumentation de collecte de données et qui peut servir à l'insertion, au positionnement ou à l'enlèvement des objets à tester. Les essais de missiles à taille réelle dans les souffleries à débit continu donnent les résultats les plus précis, mais nécessitent une puissance élevée (de l'ordre de 200 000 ch) pour déplacer les grands volumes d'air à des vitesses de vol.

Le tunnel de purge stocke l'air ou d'autres gaz sous haute pression dans de grands réservoirs ou dans des cylindres. Un conduit d'air scellé par une grande vanne ou un diaphragme relie les réservoirs au cône d'entrée du tunnel et à la section d'essai. Les parois du tunnel sont généralement faites d'acier relativement épais et sont parfois recouvertes d'isolant en raison des températures élevées générées par des vitesses de vent très élevées. Un gros compresseur est utilisé pour pomper l'air sous pression dans les réservoirs avant chaque essai.

Les installations d'essais aérodynamiques pour les vitesses les plus élevées sont généralement du type à purge. Ils sont susceptibles d'être appelés tubes à choc au lieu d'être appelés souffleries, et ils sont susceptibles d'être dimensionnés uniquement pour des maquettes à petite échelle. Afin de résister aux pressions et aux températures extrêmes, ils peuvent être constitués de tuyaux métalliques ronds et les sections d'essai ne sont pas toujours munies de portes. Les sections de tuyau ou de tube sont reliées par des brides de sorte que la section d'essai puisse être facilement enlevée pour placer les modèles d'essai à l'intérieur du tube.

**Aspect (à l'emballage):** Les plus grandes souffleries sont conçues sur mesure et construites sur place. Même les souffleries relativement petites qui tiennent dans une seule pièce et qui peuvent être fabriquées en série ne sont généralement pas entièrement assemblées avant l'expédition. Les composants individuels tels que le moteur du compresseur, les pales du ventilateur, les aubes d'angle (pour les tunnels de circulation), la section d'essai complète ou les parois de la section d'essai, les fenêtres, les panneaux de commande et d'instrumentation sont mis en caisse ou montés sur palettes pour expédition. Les parois des tunnels sont généralement expédiées sous forme d'éléments structuraux devant être assemblés sur le site de l'installation.



15.B.3. Bancs d'essai, utilisables avec les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2. ou les sous-systèmes visés aux articles 2.A. ou 20.A, capables de supporter les fusées et moteurs-fusées à propergol solide ou liquide ayant une poussée de plus de 68 kN ou de mesurer simultanément les trois composantes du vecteur poussée.

- Chine
- Allemagne
- Fédération de Russie
- États-Unis
- France
- Pays-Bas
- Royaume Uni

Production  
globale



**Nature et But:** Compte tenu du seuil de poussée de 68 kN (environ 15 000 livres), les bancs et les stations d'essai ont tendance à inclure de grandes structures rigides pour tester les systèmes de fusée, les moteurs de fusée à propergol solide, hybride ou à gel et les moteurs de fusée liquide. Ils maintiennent en toute sécurité les éléments d'essai fonctionnant à pleine puissance tout en recueillant des données de performance sur les paramètres critiques. Ces données appuient l'élaboration de la conception et confirment l'intégrité et le rendement de la conception, y compris la fiabilité et la durabilité du fonctionnement. Les moteurs fusées à propergol liquide sont parfois testés sur des bancs d'essai pour vérifier leurs performances avant livraison.

**Mode de fonctionnement:** L'élément à tester est monté sur le banc d'essai ou la station d'essai. Les capteurs sont positionnés et vérifiés. Le personnel est évacué de la zone d'essai et les données sont recueillies à l'aide de capteurs et stockées à distance pendant que la fusée est utilisée.

Les gros moteurs fusée à propergol solide ont traditionnellement été testés horizontalement, bien que certains puissent être testés verticalement. Les gros moteurs de fusée à propergol liquide sont généralement testés verticalement ou horizontalement, tandis que les propergols sont fournis par les réservoirs de l'installation. Parfois, des étages complets de liquide sont testés (c.-à-d. y compris les réservoirs de vol) verticalement afin que les liquides atteignent les extrémités inférieures des réservoirs et donc les conduits d'alimentation du moteur. Les étages de fusée à propergol liquide sont placés sur le banc d'essai avant le chargement du propergol, de sorte qu'ils sont légers et relativement faciles à soulever en position verticale. Les capteurs mesurent les pressions, les débits de propergol, les forces, la synchronisation des événements, les vibrations, les déplacements et les températures. Les moteurs de fusée tournent jusqu'à l'épuisement; en revanche, les moteurs de fusée à propergol liquide et les moteurs de fusée hybrides ou à propergol gélifié peuvent être freinés ou arrêtés. Des inspections post-test sont effectuées et les données sont analysées.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les bancs et stations d'essai sont des équipements essentiels dans la phase de développement d'un programme de missiles. Les bancs d'essai de moteurs de fusées à propergol liquide sont également utilisés pour les essais à grande échelle de composants de moteurs tels que les injecteurs, les dispositifs de combustion et les turbopompes.

**Autres usages:** Des bancs et stations d'essai horizontaux similaires, bien que souvent plus petits, sont utilisés pour tester les réacteurs d'avions, y compris pour les systèmes d'UAV, y compris les missiles de croisière. Alors que les réacteurs sont testés en position horizontale, leurs bancs d'essai sont souvent des structures verticales qui élèvent les moteurs au-dessus du sol, pour la sécurité du personnel et pour obtenir de l'air exempt d'objets libres et de débris qui peuvent se trouver sur le sol à portée de l'entrée d'air.

**Aspect (sortie d'usine)** Un banc d'essai horizontal de moteur-fusée à propergol solide (Figure 139) se compose généralement d'un chariot, d'une tasse de poussée, d'un capteur de force, d'un bloc de poussée et d'instruments. Le moteur-fusée à propergol solide est d'abord fixé horizontalement sur un chariot mobile et verrouillé vers le



**Schéma 139: Le système de mesure de charge sur la station d'essai d'un moteur à propergol solide (ATK)**

bas. Les moteurs plus gros sont souvent reliés à un châssis, qui est ensuite inséré dans la tasse de poussée; les moteurs plus petits sont souvent insérés directement dans la tasse de poussée. La tasse de poussée est accouplée à un capteur de force qui mesure les trois composantes de poussée, une axiale et deux latérales, cette dernière pour vérifier que les forces hors axe sont faibles. La structure du capteur peut également être conçue pour mesurer des couples (forces de rotation). Le capteur de force est monté sur un grand bloc de béton ou un cadre métallique appelé le bloc de poussée, qui absorbe les variations de force vers l'avant lorsque le moteur est mis à feu. L'instrumentation connectée au dynamomètre envoie les données à un poste de lancement contenant l'équipement d'enregistrement. L'ensemble est habituellement à l'extérieur, mais peut être partiellement ou totalement enfermé dans un bâtiment en béton ou dans une tranchée.

Les moteurs fusée à propergol liquide utilisent des bancs d'essai verticaux, de grandes structures à portique en poutres et profilés d'acier (Figure 140). Pour les essais horizontaux, les bancs d'essai de fusées à propergol liquide sont proches du sol, généralement constitués d'une plate-forme en béton supportant une structure métallique sur laquelle le moteur peut être monté. Le moteur-fusée à propergol liquide est fixé à des dynamomètres qui



**Schéma 141: Une station d'essai verticale conçue pour les moteurs-fusée à propulsion liquide. (Systèmes interorbitaux)**



**Schéma 140: Un moteur-fusée à propergol solide sur une station d'essai. (Avio SpA)**

mesurent les composantes de poussée comme indiqué ci-dessus; ces données sont envoyées à un poste de lancement pour enregistrement. Les réservoirs qui transportent les propergols, le seau à flammes et, en général, le béton qui éloigne les gaz d'échappement du banc d'essai font également partie de l'installation.

**Aspect (à l'emballage):** Les bancs et stations d'essai de fusées sont conçus sur mesure et généralement construits sur place, de sorte qu'ils sont rarement expédiés sous forme de structures assemblées. L'examen des dessins de conception et des instructions de fabrication ou d'assemblage permet de déterminer l'utilisation prévue des matériaux et composants de construction.



15.B.4. Chambres d'environnement comme suit, utilisables avec les systèmes visés aux articles 1.A. ou 19.A. ou les sous-systèmes visés aux articles 2.A. ou 20.A

a. Chambres présentant toutes les caractéristiques suivantes:

1. capables de simuler toutes les conditions de vol suivantes:

a. Altitude d'au moins 15 km; ou

b. Fourchette de températures allant d'au moins -50°C à +125°C; et

2. Incorporant, ou conçues ou modifiées pour incorporer un générateur de vibrations ou autre dispositif d'essai aux vibrations en vue de produire un environnement vibratoire supérieur ou égal à 10 g efficaces (valeur efficace), mesuré «table nue», entre 20 Hz et 2 kHz et communiquant des forces supérieures ou égales à 5 kN.

**Notes techniques:**

1. L'article 15.B.4.a. décrit des systèmes capables de créer un environnement vibratoire avec une onde simple (par exemple une onde sinusoïdale) et des systèmes capables de créer une vibration aléatoire à large bande (c'est-à-dire un spectre de puissance).

2. À l'article 15.B.4.a.2, conçues ou modifiées signifie que la chambre d'environnement fournit les interfaces appropriées (dispositifs d'étanchéité, par exemple) pour incorporer un générateur de vibrations ou autre dispositif d'essai aux vibrations visés à cet article.

b. Chambres d'environnement capables de simuler toutes les conditions de vol suivantes:

1. Environnement acoustique à un niveau global de pression sonore de 140 dB (par rapport à  $2 \times 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>) ou plus ou avec un niveau de sortie de puissance acoustique total de 4 kW ou plus; et

2. Présentant l'une des caractéristiques suivantes:

a. Altitude d'au moins 15 km; ou

b. Fourchette de températures allant d'au moins -50°C à +125°C; et

**Nature et But:** Les essais environnementaux dans les installations au sol exposent les composants, les sous-systèmes et les véhicules entiers aux basses pressions, aux températures élevées et basses, aux vibrations et à l'acoustique du vol motorisé afin de mesurer les réponses. Les données générées sont utilisées pour confirmer ou corriger des conceptions et ainsi assurer la faisabilité du vol.

**Mode de fonctionnement:** La haute altitude est simulée en scellant des objets de test dans des chambres de pression robustes qui sont ensuite évacuées à l'aide de pompes à vide. Les températures de vol sont simulées à l'intérieur de chambres thermiquement isolées, équipées d'appareils de chauffage et de réfrigération. Les chambres de température contrôlées par le MTCR doivent également être équipées pour reproduire des vibrations ou des environnements acoustiques spécifiques. Les équipements vibrants sont des tables motorisées capables de fournir des spectres amplitude-fréquence aux niveaux indiqués ci-dessus et de reproduire l'amplitude des vibrations ressenties par un composant, un sous-système ou un système pendant le vol propulsé. Les chambres acoustiques utilisent une combinaison d'avertisseurs sonores à entraînement électrostatique ou électromagnétique, comme des haut-parleurs, pour fournir un spectre de pressions sonores comme celles générées par l'échappement des moteurs de fusée et le vol aérodynamique à très grande vitesse.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les essais d'altitude sont utilisés pour étudier les performances du moteur, le transfert de chaleur, l'allumage en altitude, le développement des tuyères et les phénomènes de dynamique du propergol. Des essais simultanés température-vibrations et température-acoustique sont utilisés pour soumettre le matériel de missiles à des environnements de vol haute fidélité afin de développer la technologie et de qualifier les missiles pour le vol. De tels essais ne sont pas requis pour les programmes de missiles de base, mais sont nécessaires pour le développement avancé. Cet équipement peut également réduire le coût d'un programme d'essais en vol, mais certains de ces équipements, en particulier les grandes enceintes climatiques, peuvent être très coûteux.

**Autres usages:** Des essais acoustiques à haute altitude et simultanés en température, en vibration et en température sont régulièrement effectués sur des satellites et des composants d'avion.

**Aspect (sortie d'usine)** Les chambres de pression environnementale sont des chambres cylindriques robustes, généralement métalliques, étanches à l'air et cylindriques avec des extrémités bombées ou hémisphériques pour résister à la pression extérieure d'une atmosphère (plus une marge de sécurité). Elles ont souvent des hublots en verre épais ou en acrylique. Un panneau d'accès ou une porte à une extrémité sert à insérer et à retirer les éléments de test.

Elles sont souvent liées à de grandes pompes à vide qui vident la chambre. Leur taille est en fonction des articles à examiner; ainsi, elles peuvent varier de moins d'un mètre à des dizaines de mètres de côté. Elles sont habituellement

- |                       |              |
|-----------------------|--------------|
| •Canada               | •Chine       |
| •France               | •Allemagne   |
| •Inde                 | •Israël      |
| •Italie               | •Japon       |
| •Fédération de Russie | •Royaume Uni |
| •États-Unis           |              |

Production globale



Les chambres de température pour les essais de vibration contiennent un dispositif puissant pour secouer les éléments d'essai.



Schéma 142: Un moteur-fusée à propergol solide de taille réelle en test à haute altitude simulée (AEDC)

soutenues par de nombreux bâtiments abritant des pompes, l'alimentation, la collecte de données et les opérations. La Figure 142 montre une vue intérieure d'un moteur-fusée à propergol solide testé à une altitude simulée.

Les chambres de température sont des chambres thermiquement isolées ou des pièces dotées d'équipements de chauffage et de refroidissement. Les chambres de température contrôlées par le MTCR comportent des dispositions pour les essais de vibration ou acoustiques à diverses températures rencontrées en vol.



**Schéma 143: Une configuration d'appareillage d'essai de vibration et environnementale. (TUV Rheinland)**

Les chambres de température pour l'essai acoustique sont de grande salle avec des pavillons acoustiques montés dans les murs. Les pavillons eux-mêmes sont monotoniques (fonctionnent sur une fréquence) et varient en longueur de plusieurs centimètres pour les pavillons à haute fréquence à 1 m pour les pavillons de basse fréquence, avec les tailles de secteur de sortie, ou bouche, correspondants. Les essais acoustiques exigent habituellement que la chambre soit tapissée de matériel très grossièrement ondulé (souvent en forme de cône), doux, poreux et insonorisant.

**Aspect (à l'emballage):** Les chambres environnementales varient en taille, mais elles sont généralement très grandes et construites sur place. Les grandes chambres de température contrôlées par le MTCR peuvent être expédiées sous forme de panneaux préfabriqués de matériaux de construction. Les instructions de montage ou les plans de construction peuvent aider à identifier l'utilisation prévue. Les chambres de température plus petites sont expédiées comme un réfrigérateur ordinaire. Les tables d'essais dynamiques partiellement assemblées sont livrées dans de simples caisses en bois, généralement avec des contours internes et des amortisseurs pour les pièces. Les conteneurs d'expédition de ces morceaux d'équipement robustes ne sont pas susceptibles d'avoir un marquage de manipulation spécial. Les pavillons acoustiques sont embarqués dans

des boîtes métalliques ou des caisses en bois. Puisque les diaphragmes de haut-parleur dans ces pavillons sont des composants sensibles, les conteneurs d'expédition peuvent avoir des marquages de manipulation spéciaux.

Ce dispositif, connu sous le nom de propulseur ou agitateur, comporte habituellement une table ronde, plate et en acier, qui peut avoir des emplacements de montage préperforés ou taraudés pour fixer les articles d'essai. Le mouvement de la table est souvent entraîné par un moteur électrique linéaire cylindrique à vitesse variable. Selon la taille des articles testés, le poids de ces tableaux varie de dizaines à des milliers de kilogrammes (Figure 143 & Figure 144). Les chambres environnementales contrôlées sous cette rubrique peuvent simuler des conditions de vol de 10 g rms ou plus de 20 Hz à 2 000 Hz, transmettre des forces de 5 kN ou plus, et avoir des températures de fonctionnement inférieures -50 °C jusqu'à +125 °C. Figure 143 montre un appareil d'essai combiné environnement / vibrations.

Les chambres de température pour l'essai acoustique sont de grande salle avec des pavillons acoustiques montés dans les



**Schéma 144: Chambre à environnement contrôlé avec capacité de vibration (RMS Dynamic Test Systems)**

15.B.5. Accélérateurs capables de délivrer des rayonnements électromagnétiques produits par Bremsstrahlung à partir d'électrons accélérés à 2 MeV ou plus, et équipement contenant ces accélérateurs, utilisables dans les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2. ou les sous-systèmes visés aux articles 2.A. ou 20.A

**Note:**

*L'article 15.B.5. ne vise pas les systèmes ou équipements conçus à des fins médicales*

- Chine
- Inde
- Fédération de Russie
- États-Unis
- Allemagne
- Japon
- Royaume Uni

Production globale



**Nature et But:** Les accélérateurs commandés par le MTCR sont de trois types de base: les accélérateurs à radiofréquence linéaire (linac), les appareils à rayons X instantanés et les accélérateurs électrostatiques à haute tension à charge mécanique (type Van de Graaff). Leur utilisation principale est de créer des rayons X capables de pénétrer les pièces de missiles (comme les moteurs de fusée à propergol solide) afin que l'on puisse faire des radiographies de leur intérieur. D'autres utilisations des rayons X énergétiques comprennent la simulation des effets des armes nucléaires et la photographie aux rayons X en stop-action d'événements à très haute vitesse comme les explosions et les impacts.

**Mode de fonctionnement:** Les accélérateurs les plus intéressants sont de type linéaire. Ils accélèrent un faisceau ou une grappe d'électrons à des vitesses approchant la vitesse de la lumière en les faisant passer dans des cavités chargées d'un potentiel électrique (tension) fourni par un générateur RF. Comme l'effet de ces cavités est additif, l'énergie électronique totale de millions d'électrons-volts (MeV) peut être obtenue à partir de dispositifs relativement petits. Ce faisceau énergétique d'électrons sort du linéaire et frappe une cible (généralement un métal dense comme le tungstène). Les électrons émettent des rayons X lorsqu'ils décèlent à l'intérieur de la cible; ce phénomène est appelé "bremsstrahlung", en allemand pour le rayonnement de freinage. Les rayons X traversent l'objet et sont enregistrés sur film ou, de plus en plus, dans des capteurs électroniques qui affichent immédiatement l'image sur un écran d'ordinateur. Un accélérateur Van de Graaff crée normalement un grand potentiel électrostatique en entraînant mécaniquement une courroie en caoutchouc vulcanisé ou un cordon isolant de billes métalliques polies sur une surface isolante. Les cibles utilisées pour arrêter les électrons dans les générateurs électrostatiques sont des feuilles métalliques comme celles utilisées dans les accélérateurs linéaires. La plupart des appareils à rayons X flash fonctionnent en chargeant un très grand nombre de condensateurs à haute tension, puis en les déchargeant soudainement. Comme le linac, le courant d'électrons qui en résulte frappe une cible en métal lourd et crée des rayons X.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'une des utilisations les plus importantes des accélérateurs linéaires est la production de rayons X pour le contrôle non destructif des moteurs à propergol solide. Ils sont utilisés pour trouver des fissures et des vides dans le grain du propergol, des fissures et des soudures incomplètes dans le boîtier, ou des collages incomplets sur l'isolant ou le revêtement intérieur. Ces appareils à rayons X peuvent être utilisés pour inspecter la plupart des composants de missiles tels que les éléments structuraux, les soudures, les tuyères et les pièces des turbopompes. Si l'un de ces problèmes de qualité est présent et n'est pas détecté, ils peuvent entraîner une défaillance catastrophique de l'étage moteur, d'où le besoin critique de cet équipement. Les accélérateurs linéaires sont aussi utilisés pour étudier les effets des rayonnements nucléaires de l'électronique des missiles et

pour tester l'équipement et les pièces afin de déterminer la dureté du rayonnement. Ce sont également les principales utilisations des grands appareils à rayons X flash. Les accélérateurs Van de Graaff ne sont généralement pas utilisés à ces fins en raison de leur taille et de leur faible courant de faisceau (et donc de leur faible puissance de rayonnement X).

**Autres usages:** Depuis plus de 30 ans, les appareils à rayons X industriels à micro-ondes, à base d'accélérateurs et à haute énergie sont couramment utilisés pour une grande variété d'applications industrielles. Ces applications comprennent la détection des défauts des grandes pièces moulées et des assemblages soudés utilisés dans les secteurs de l'automobile, de la construction navale, de l'aérospatiale et de la fabrication de composants de production d'énergie. Ces machines sont également utilisées dans les grands systèmes de sécurité pour la détection de contrebande ou d'explosifs dans les conteneurs. Une technologie similaire est employée dans la production de machines utilisées pour traiter le cancer.

**Aspect (sortie d'usine)** L'accélérateur 2+ MeV le plus couramment utilisé est le linac, comme le montre la Figure en raison de sa petite taille et de sa robustesse. Ces appareils à rayons X se composent de cinq parties principales: l'accélérateur, la tête à rayons X, les amplificateurs ou modulateurs RF, une console de commande et un coffret pour pompe à eau. La structure en forme de boîte de la Figure 145 contient l'accélérateur et la tête radiographique.

La source des rayons X est la tête à rayons X. Elle est reliée au modulateur RF au moyen d'un guide d'ondes, qui est un conduit ou câble rectangulaire rigide ou semi-rigide. La partie accélérateur de la tête radiographique est un tube ou un tuyau avec des disques semi-circulaires sur les côtés alternant sur toute sa longueur. Cet ensemble peut se trouver au centre d'un électroaimant de plus grand diamètre. Le modulateur ou amplificateur RF, qui fournit



Schéma 145: Système typique de rayon X d'accélérateur linéaire (Varian Associates)

l'énergie RF au tube d'accélération, se trouve souvent dans un coffret séparé. Cette énergie est normalement couplée par un guide d'ondes rectangulaire ou, moins fréquemment, par un câble coaxial. Le modulateur fonctionne à une fréquence correspondant à la structure d'accélération, normalement dans la gamme de 1 GHz à 3 GHz. Les autres composants de soutien sont

le système de contrôle et le système de refroidissement liquide. Ces systèmes commandent et refroidissent l'accélérateur pour le garder dans une plage étroite de températures de fonctionnement. Des dimensions typiques pour la tête de rayon X, le coffret de modulateur, et le pupitre de commande sont montrés dans le tableau 1.

Les rayons X produits par les accélérateurs contrôlés par le MTCR sont d'énergie assez haute pour qu'ils exigent une épaisseur de protection de plomb de plusieurs centimètres. Ces accélérateurs sont souvent expédiés sans protection puisque la protection peut être aisément fabriquée et installée par le destinataire. Souvent un système non blindé est placé à l'intérieur d'un bâtiment doté de blindage. L'autre type d'accélérateur pour usage dans la génération de rayon X à grande énergie est un type de générateur Van de Graaff conduit mécaniquement. Ces systèmes sont beaucoup plus grands que des accélérateurs linéaires et plus difficiles à positionner, et ne sont pas normalement employés pour la radiographie. Ils se composent d'une alimentation haute tension capable de produire des potentiels électrostatiques de 2 MeV ou plus, d'un tube d'accélération fait de nickel fortement poli, et d'un pupitre de commande. L'alimentation et le tube d'accélération sont habituellement des pièces intégrales. Ils sont contenus dans un réservoir à haute pression fait d'acier à parois épaisses, qui quand il est opérationnel, contient un gaz diélectrique élevé tel que de l'hexafluorure de soufre ou de l'azote pur à une pression équivalent à plusieurs atmosphères. À la différence des accélérateurs linéaires, qui sont assez petits pour être tournés autour de la partie étant radiographiée, les accélérateurs électrostatiques de taille plus imposante



restent stationnaires, et l'article d'essai est déplacé si nécessaire pour réaliser le positionnement relatif désiré. Les dimensions typiques d'un système Van de Graaff sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 1: Dimensions typiques d'accélérateurs linéaires			
	Tête à rayon X	Cabinet de modulateur	Pupitre de commande
Hauteur	0,5 m	1,0 m	0,2 m
Largeur	0,5 m	0,5 m	0,3 m
Profondeur	1,0 m	1,0 m	0,3 m
Poids	200 kg	300 kg	3 kg

Tableau 2: Dimensions typiques pour un système Van de Graff		
	Réservoir sous pression	Pupitre de commande
Longueur	2,5 m	0,2 m
Diamètre	1,0 m	
Largeur	0,2 m	
Poids	1200 kg	2 kg

La taille des appareils à rayons X Flash varie de celle d'un appareil de bureau à celle d'un grand système qui nécessite des bâtiments spéciaux. Une unité typique utilisée pour l'inspection des grains de propergol des moteurs fusée à propergol solide est illustrée Figure 146.



**Schéma 146: Une unité de radiographie éclair de 2,3MeV utilisée pour inspecter des moteurs-fusées solides (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))**

**Aspect (à l'emballage):** Les accélérateurs linéaires sont emballés pour l'expédition dans des caisses ou des boîtes. Ils peuvent se présenter sous la forme de trois coffrets distincts. La tête à rayons X et le modulateur proviennent normalement du même fournisseur. Le système de refroidissement et le système de contrôle peuvent être achetés séparément.

L'emballage se compose de mousse, de polystyrène expansé ou d'un autre matériau de remplissage amortissant les chocs pour protéger le modulateur

des vibrations et des chocs excessifs. L'équipement peut être étiqueté avec des étiquettes de mise en garde contre les rayons X, des panneaux de champ RF et, éventuellement, des étiquettes indiquant la haute tension. Le système peut être plus lourd que les systèmes à basse énergie en raison de la quantité de blindage au plomb, s'il est expédié avec le blindage installé, nécessaire pour protéger le personnel contre les rayons X pénétrant.



Les accélérateurs électrostatiques sont beaucoup plus gros. L'alimentation haute tension et le tube d'accélération sont expédiés ensemble à l'intérieur du réservoir sous pression. En raison de son poids, le réservoir sous pression est très probablement expédié dans une caisse conçue pour la manutention par chariot élévateur. L'unité n'est pas susceptible d'être expédiée en condition opérationnelle et possède habituellement du matériel d'emballage supplémentaire à l'intérieur du réservoir sous pression pour supporter la colonne d'alimentation haute tension et d'accélération.

15.B.6. «Installations d'essais aérodynamiques» utilisables pour les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A. ou les sous-systèmes visés aux articles 2.A. ou 20.A, et présentant les caractéristiques suivantes:

- a. Une alimentation électrique égale ou supérieure à 5 MW; ou
- b. Une pression totale d'alimentation en gaz égale ou supérieure à 3 MPa.

**Notes techniques:**

*Les «installations d'essais aérothermodynamiques» comprennent des installations à jet d'arc à plasma et des souffleries à plasma pour l'étude des effets thermiques et mécaniques du flux d'air sur les objets.*

- Belgique
- Chine
- France
- Allemagne
- Israël
- Italie
- Japon
- Fédération de Russie
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** Les installations d'essais aérothermodynamiques simulent les conditions d'écoulement difficiles qu'un missile rencontre lorsqu'il vole à des vitesses très élevées, telles que celles associées à la rentrée balistique. Des installations d'essais aérothermodynamiques sont également utilisées dans le développement de systèmes de protection thermique pour les missiles balistiques.

Les installations à jet d'arc plasma fournissent des flux de température à grande vitesse capables de reproduire les températures et les flux de chaleur associés au réchauffement de l'air de réentrée local à l'article à tester. Une soufflerie à plasma (soufflerie à arc plasma) incorpore un plasma pour simuler le réchauffement aérodynamique et l'écoulement près de la surface du missile volant à très grande vitesse.

**Mode de fonctionnement:** Un jet d'arc (Figure 147) est un dispositif dans lequel les gaz sont chauffés et amenés à des températures très élevées et des vitesses supersoniques/hypersoniques par un arc électrique continu entre deux jeux d'électrodes. Une source de haute tension produit un arc électrique qui surchauffe le gaz d'essai jusqu'au point d'ionisation. Les gaz (généralement de l'air) passent à travers une tuyère destinée à un échantillon d'essai dans le vide et s'écoulent sur celui-ci, produisant une approximation raisonnable de la température et de la pression de surface et de l'enthalpie du gaz que l'on trouve dans un écoulement supersonique à grande vitesse, comme celui que connaît un véhicule au moment de sa rentrée atmosphérique.

Les souffleries au plasma utilisent un arc électrique à fort courant pour chauffer le gaz d'essai à très haute température. Les conditions de plasma dans une soufflerie à plasma sont déterminées par la source de plasma utilisée, les paramètres de fonctionnement et la position de l'objet à tester dans le faisceau de plasma. Une soufflerie à plasma se compose d'une chambre à arc, d'une tuyère, d'une chambre d'essai et d'un système à vide pour maintenir l'enceinte d'essai à basse pression. Le gaz d'essai froid s'écoule à travers la chambre d'arc et la tuyère. Un arc électrique est établi à travers le gaz entre une électrode isolée dans la chambre à arc et une surface de la chambre à arc. L'arc électrique élève la température du gaz d'essai à un niveau d'ionisation produisant un plasma, qui est un



Schéma 147: Installation de chauffe à interaction (60 MW) à jet d'arc. (National Aeronautics and Space Administration (NASA))

mélange d'électrons libres, d'ions chargés positivement et d'atomes neutres. L'argon est généralement utilisé comme gaz d'essai au lieu de l'air en raison du degré d'ionisation plus élevé qui peut être atteint pour une puissance absorbée donnée.

Pour reproduire le plus précisément possible les conditions d'écoulement près de la surface de l'objet d'essai présente pendant le vol à grande vitesse dans la soufflerie à plasma, les caractéristiques du faisceau de plasma et les modifications du matériau à examiner doivent être déterminées aussi précisément que possible.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les installations d'essais aérothermodynamiques d'une puissance électrique égale ou supérieure à 5 MW ou d'une pression totale d'alimentation en gaz égale ou supérieure à 3 MPa sont utilisées pour tester les missiles dans des conditions environnementales de rentrée.

**Autres usages:** Des installations d'essais aérothermodynamiques sont également utilisées pour tester les systèmes de protection thermique des engins spatiaux aux conditions environnementales de rentrée et aux conditions environnementales associées aux explorations planétaires. Certains systèmes plasma haute température ont des applications industrielles dans la gazéification à haute température de la biomasse et des déchets non dangereux, la destruction de déchets dangereux (comme les cendres volantes et l'amiante), la réduction et l'immobilisation des déchets radioactifs de faible activité et dans l'industrie de l'acier.

**Aspect (sortie d'usine)** Les installations de soufflerie à jet d'arc et de soufflerie au plasma peuvent varier en taille, allant de modèles à petite échelle qui s'intègrent dans une pièce d'un bâtiment (Figure 148) à des installations qui englobent une grande baie entière ou de grands complexes comprenant plusieurs bâtiments qui abritent les divers composants du système à jet d'arc (Figure 18).

**Aspect (à l'emballage):** Les installations à jet d'arc et les souffleries à plasma sont généralement conçues sur mesure et construites sur place. Les composants des installations de soufflerie à jet d'arc et de soufflerie à plasma, tels que les sections d'essai, les panneaux de contrôle et d'instrumentation, sont mis en caisse et montés sur des palettes lourdes pour le transport.



Schéma 148: Image de l'intérieur de l'installation d'évaluation des matériaux et des structures de rentrée atmosphérique (Arc-Jet) (NASA) du Johnson Space Center (JSC) Schéma 149: Aperçu aérien du complexe Arc Jet au Centre de recherche Ames de la NASA (NASA)

## 15.C. Matériaux

Aucune.

## 15.D. Logiciel

15.D.1. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié aux fins de l'«utilisation» de l'équipement spécifié à l'article 15.B., utilisable pour les systèmes mentionnés aux articles 1.A., 19.A.1. ou 19.A.2 ou les sous-systèmes mentionnés aux articles 2.A ou 20.A.

**Nature et But:** Les logiciels utilisés dans les installations d'essai des systèmes de fusées et des UAV sont parfois spécialement conçus pour faire fonctionner des équipements d'essai spécialisés et pour enregistrer les résultats des essais en vue de leur analyse ultérieure. Dans certains cas, cependant, l'utilisateur final peut configurer des logiciels modernes à usage général pour répondre aux besoins de ces installations d'essai. Une fonction générale du logiciel consiste à faire fonctionner automatiquement un équipement d'essai spécialisé, tandis qu'une deuxième fonction consiste à recueillir et à stocker les données d'essai. Cette dernière fonction, l'acquisition de données, est plus susceptible d'être effectuée à l'aide d'un logiciel à usage général qui n'est pas contrôlé à l'article 15.D.1. Une troisième fonction consiste à analyser les résultats des tests, qui peuvent être effectués à l'aide d'un logiciel spécialisé ou d'un logiciel à usage général spécialement configuré.

Par exemple, les logiciels utilisés pour faire fonctionner les systèmes d'essai de vibration fournissent des signaux appropriés aux contrôleurs numériques qui simulent les vibrations associées au vol propulsé par des missiles balistiques. Ce signal peut varier sur une gamme de fréquences et d'amplitudes. Le système informatique de l'installation enregistre les signaux de l'accéléromètre pour déterminer la réponse vibratoire de l'objet à tester, comme une carte aéro-électronique, un gyroscope à semi-conducteurs ou un composant de propulsion. Un autre exemple de tâche logicielle consiste à recueillir des données de soufflerie pendant les essais instrumentaux de la cellule d'avion. Les systèmes informatisés peuvent enregistrer la vitesse du vent et les données de portance, de traînée, de stabilité, d'effets thermiques et de signature infrarouge générées par l'article testé. Le moteur-fusée à propergol solide et le logiciel d'essai du moteur-fusée à propergol liquide recueillent des informations à partir du moteur instrumenté et des composants du moteur pendant que le moteur est testé. Les résultats des essais comprennent les pressions transitoires et de fonctionnement au démarrage, les déformations du carter du moteur, les données thermiques et les données sur le rendement du moteur et du moteur, entre autres lectures. Toutes ces données sont analysées afin d'évaluer la performance du sous-système de fusée et la pertinence de sa conception.

**Mode de fonctionnement:** Un système d'essai vibratoire typique comprend un générateur de vibrations pour faire vibrer les articles d'essai qui y sont fixés; un amplificateur de puissance électrique ou une autre source d'énergie (par exemple hydraulique) pour entraîner l'agitateur; un contrôleur pour commander l'amplificateur de puissance en fonction de la fréquence et de l'amplitude des vibrations désirées; et un système de refroidissement par air ou liquide pour l'agitateur et l'amplificateur. L'article d'essai est solidement fixé sur la table vibrante, tandis que l'article d'essai a ses propres capteurs montés et autres capteurs d'instrumentation, généralement de petits accéléromètres piézoélectriques auto-excitants. D'autres câbles de signaux sont raccordés pour enregistrer toute réponse électrique interne ou tout changement de signal pouvant survenir pendant le test. L'opérateur saisit la fréquence de vibration et l'information d'amplitude au contrôleur de l'ordinateur qui traduit ensuite cette entrée en signaux envoyés à l'amplificateur de puissance qui commande la table vibrante.

Les logiciels utilisés pour appuyer les essais de mise à feu en soufflerie et de moteurs fusée à propergol solide ou de moteurs fusée à propergol liquide peuvent comporter une séquence programmée de vitesses et de temps en soufflerie, ou une séquence programmée d'ouvertures et de fermetures de soupapes dans le cas des essais de fusées liquides. Simultanément pendant le test, d'autres logiciels recueillent les données des systèmes d'instrumentation et des capteurs montés sur l'article testé. Alors que la fonction d'acquisition des données peut être assurée par un ordinateur distinct, les logiciels modernes à usage général permettent d'effectuer des tests et

de recueillir des données avec un seul ordinateur. Le volet acquisition de données du logiciel peut être doté de capacités analytiques intégrées pour aider l'ingénieur missile à évaluer les résultats de l'essai.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ce type de logiciel contrôle l'équipement d'essai qui simule l'environnement qu'un système de fusée ou d'UAV subira en vol sans avoir à se servir d'un missile pour effectuer un essai. L'application de bonnes procédures d'essai au sol sur les systèmes de vol réduit le temps et les coûts de développement de ces sous-systèmes.

**Autres usages:** Ce type de logiciel est disponible pour d'autres industries. Les stations d'essais vibratoires et les souffleries sont utilisées pour tester d'autres produits militaires et civils, tels que les avions. Le même logiciel, éventuellement avec des modifications mineures, est utilisé pour contrôler le fonctionnement de ces équipements de test et pour contrôler les résultats des articles de test. Les logiciels d'usage général pour l'instrumentation d'essai (p. ex. LabVIEW™) sont utilisés à des fins très diverses et ne sont pas visés à l'article 15.D.1.

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique qui, historiquement, aurait été stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre, mais qui pourrait également être vendu et transféré directement sur Internet. Tous les médias communs comprenant la bande magnétique, les disquettes, les disques durs amovibles, les lecteurs flash USB, les disques compacts et les documents peuvent contenir ces logiciels et données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant ce «logiciel» sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce «logiciel» d'intérêt et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique.

## 15.E. Technologie

15.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de «logiciels» mentionnés aux articles 15.B. ou 15.D.

**Nature et But:** La technologie nécessaire au développement d'installations et d'équipements d'essai, qui sont à leur tour utilisés pour mettre au point et produire des fusées ou des UAV, nécessite une connaissance approfondie des systèmes de vol à tester et de la réaction prévue aux essais. De l'expérience est également requise pour concevoir, construire et utiliser un équipement d'essai suffisamment précis pour simuler avec exactitude l'environnement de vol tout en enregistrant les mesures. En l'absence de transfert de technologie, un pays peut développer des logiciels d'essai spécialisés ou configurer des logiciels d'usage général au fil du temps à mesure qu'il obtient des informations basées sur des expériences. Les dessins techniques (parfois appelés plans directeurs) décrivant en détail la façon de fabriquer ou de faire fonctionner l'équipement d'essai lié aux missiles seraient évidemment des éléments technologiques essentiels. Le transfert de savoir-faire pour la génération ou la configuration de logiciels d'essai et d'analyse constituerait également un transfert de technologie contrôlée par le MTCR.

**Mode de fonctionnement:** L'assistance technique est disponible sous plusieurs formes. L'assistance technique peut consister en un enseignement dispensé par une personne expérimentée dans un ou plusieurs sujets contrôlés, tels que les gros équipements d'essais de vibrations ou les essais de moteurs de fusée à propergol liquide, qui fait office de formateur dans une classe sur ou à proximité du site de production. Un pays peut recevoir une assistance technique d'un ou de plusieurs services de conseil spécialisés dans une compétence de production particulière. Un pays peut recevoir une aide à l'approvisionnement soit sous forme de fourniture d'équipement technique, de machines ou de matériel, soit sous forme d'aide pour déterminer l'article nécessaire au programme. Enfin, un pays peut recevoir une assistance technique en envoyant des étudiants dans d'autres pays possédant la technologie nécessaire pour suivre une formation et mettre en pratique les compétences nécessaires pour construire et exploiter les systèmes requis.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'assistance technique nécessaire à la construction et au fonctionnement du matériel d'essai des fusées et des UAV ne peut être utilisée qu'à ces fins (par exemple, dans le cas des bancs d'essai) ou peut être utile dans diverses applications civiles et militaires. Les lanceurs spatiaux et les fusées sondes utilisés dans la recherche météorologique sont, avec quelques ajustements mineurs, des missiles balistiques, et la technologie utilisée dans les missiles balistiques et dans les lanceurs spatiaux ou les fusées sondes est essentiellement la même.

**Autres usages:** Les avions civils et militaires peuvent utiliser des versions réduites de cette technologie. De même, cette technologie peut être utilisée pour tester des sous-systèmes et composants sensibles pour les véhicules terrestres.

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A



Catégorie II - Article 16:  
Modelage, Simulation et  
intégration de la conception

## Catégorie II – Article 16: Modelage, Simulation et intégration de la conception

## 16.A. Équipement, assemblages et composants

16.A.1. «Calculateurs hybrides» spécialement conçus pour le modelage, la simulation ou l'intégration des systèmes visés à l'article 1.A. ou des sous-systèmes visés à l'article 2.A.

**Note:**

*La présente mesure de contrôle ne vise que les équipements fournis avec le «logiciel» visé à l'article 16.D.1.*

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| •Australie      | •Brésil               |
| •Canada         | •Chine                |
| •France         | •Allemagne            |
| •Inde           | •Israël               |
| •Italie         | •Japon                |
| •Norvège        | •Fédération de Russie |
| •Afrique du Sud | •République de Corée  |
| •Suède          |                       |
| •Royaume Uni    |                       |

Production globale

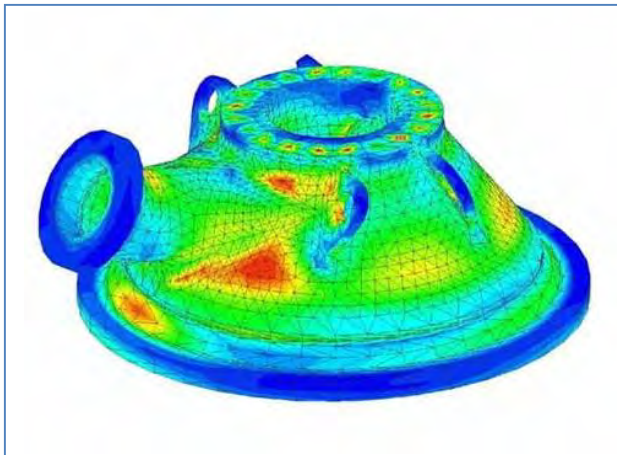


**Nature et But:** Les outils logiciels de modélisation, de simulation et d'intégration de la conception fournissent des moyens abordables de planification et d'optimisation des missions et opérations spatiales et militaires à coût élevé. En permettant au concepteur de construire et de piloter des systèmes de fusée et des véhicules aériens sans pilote (UAV) à l'aide d'ordinateurs, de nombreux changements de conception et environnements de vol peuvent être étudiés et testés à l'aide d'outils logiciels, réduisant ainsi les coûts de construction, de test et de reconception itérative du matériel aéronautique. La capacité de modélisation mathématique réduit considérablement le coût et le temps requis pour développer une fusée ou un UAV. Divers codes générés par ordinateur jouent un rôle essentiel dans la conception d'un missile ayant la capacité de performance souhaitée, en particulier pour les missiles à longue portée. L'utilisation d'une bibliothèque complète de modèles de logiciel pour valider la

performance à l'étape de conception mène à des missiles ayant les compromis relatifs à une mission les plus appropriés, y compris en ce qui concerne la portée et la charge utile.

Les ordinateurs hybrides combinent des composants analogiques et numériques pour exploiter les avantages de chacun. En plus de l'utilité historique dans la modélisation de la conception, il y a eu des applications pour le traitement des données en temps réel. Ils sont utiles dans les situations où les débits de données sont extrêmement élevés et où le rapport signal/bruit est faible, comme les matrices plan focal dans les capteurs avancés. Ces conditions peuvent engendrer des contraintes pour les ordinateurs purement numériques parce qu'ils ne peuvent pas toujours suivre le flux de données et que la faible intensité du signal ne crée pas toujours le "1" ou le "0" clair requis par un appareil numérique. Ainsi, des circuits analogiques ont parfois été utilisés pour collecter et traiter la sortie du capteur avant de numériser les données.

**Mode de fonctionnement:** La plupart des modèles logiciels de conception de missiles représentent la physique du fonctionnement des missiles pour tester les caractéristiques structurelles des missiles et de leurs composants (Figure 150 et Figure 151). Les modèles aérodynamiques modernes peuvent offrir un traitement très précis des flux internes et externes au missile et peuvent être adaptés à la géométrie spécifique du missile à évaluer.



**Schéma 150:** Le logiciel de modélisation et de simulation a été employé pour analyser la structure des moteurs-fusées et des composants, des propulseurs de satellites, des réservoirs de propergol et des antennes (EADS)

Les modèles thermodynamiques prédisent à la fois l'échauffement par friction et les réactions chimiques impliquées dans la propulsion et la protection thermique des missiles, ainsi que le flux de chaleur qui en résulte dans les composants les plus sensibles des missiles. Les applications des modèles par éléments finis dans la conception des structures de missiles sont maintenant courantes, tout comme les applications des modèles combinant le matériel de guidage et les commandes de missiles pour tester les performances. Une fois conçu, le matériel du sous-système est fréquemment testé au moyen de simulateurs de matériel incorporé. Le matériel incorporé désigne les activités d'essai qui sont en partie simulées et en partie réelles, comme les bancs d'essai du système de direction d'un missile à l'aide de véritables ailettes et des déclencheurs, tandis que l'ordinateur simule le trajet de vol qui en résulte avec un modèle mathématique pour le missile en vol complet.

Dans le cas d'un essai en circuit fermé, l'ordinateur utiliserait la trajectoire de vol calculée pour produire des données simulées du capteur de navigation qui seraient transmises au système de direction réel à l'essai. La complexité de ces essais peut varier considérablement, c'est-à-dire que le matériel testé peut être une tringlerie mécanique ou un sous-système complet de guidage et de contrôle.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les logiciels de conception des missiles peuvent être utilisés de diverses façons au cours des premières phases du processus de conception. La modélisation et les simulations peuvent être utilisées pour définir et tester les paramètres et les fonctions des capteurs et d'autres équipements de communication, ainsi que la charge utile des armes, et pour créer et définir de multiples configurations, capacités de poussée, charges aérodynamiques en vol, exigences structurelles, exigences d'isolation thermique, et les exigences de guidage ou de commande des concepts ou modèles candidats. Les conceptions matérielles des sous-systèmes basées sur ces modèles sont soumises à des tests de performance, souvent avec des logiciels de simulation en boucle, afin de valider leurs capacités et d'affiner les modèles pour les rendre plus spécifiques à la conception. L'ordinateur combine ensuite ces modèles spécifiques à la conception afin de représenter un système intégré de fusée ou d'UAV en vol et de confirmer ses capacités de conception avant les essais en vol réels. Cette approche de modélisation élimine en grande partie le besoin d'essais en vol itératifs coûteux.

**Autres usages:** Bon nombre des modèles logiciels les plus fondamentaux utilisés dans la conception des systèmes de missiles sont couramment utilisés dans le commerce. Les techniques de modélisation structurale sont utilisées dans la conception de voitures, de camions, d'avions passagers, de bâtiments et d'autres infrastructures. Les codes thermodynamiques sont utilisés dans la conception des satellites, des centrales électriques et de tous les types de moteurs. Les ordinateurs de mouvement de vol ont de nombreuses applications pour la formation des pilotes et autres simulateurs de vol.

**Aspect (sortie d'usine)** Les logiciels de conception de missiles ne se distinguent pas physiquement des logiciels commerciaux. Il est contenu sur les mêmes disques d'ordinateur ou CD-ROM, etc. Les ordinateurs analogiques/hybrides de missiles sont des appareils électroniques personnalisés généralement plus petits qu'une boîte à pain. Les ordinateurs de mouvement de vol sont des armoires avec des supports électroniques standard du commerce. Les logiciels de missiles et les modèles dynamiques de vol spécialisés peuvent également être chargés sur un ordinateur purement numérique, en temps réel (émulateur de vol). Des modèles en temps réel peuvent être utilisés pour remplacer le matériel de l'article à tester dans la boucle.

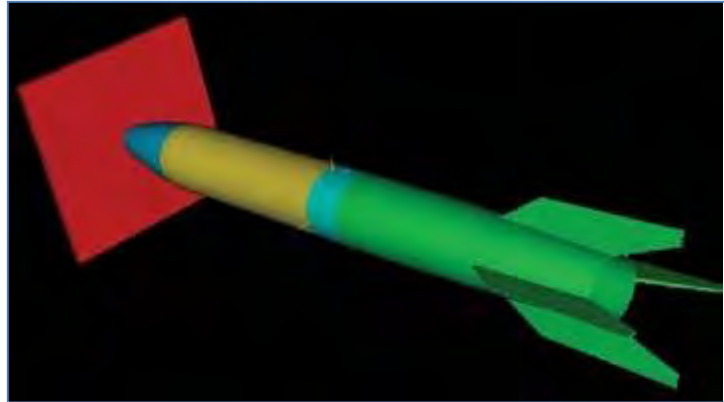


Schéma 151: Un modèle informatique utilisé pour une simulation d'un impact de missile. (Sandia National Laboratories)

**Aspect (à l'emballage):** Les produits électroniques personnalisés comme les ordinateurs analogiques/hybrides peuvent être emballés de diverses façons, y compris dans des contenants de coffre utilisés pour expédier des instruments et des écrans d'ordinateur sensibles. Les ordinateurs de mouvement de vol sont généralement expédiés comme tout autre équipement électronique. Le reste du matériel des simulateurs de vol, y compris les tables de mouvement de vol, peut être emballé dans des caisses en bois pour l'expédition. Les modèles et les logiciels en temps réel ressemblent à n'importe quel autre produit logiciel et sont emballés dans des boîtes en carton, éventuellement sous film rétractable (s'il s'agit d'un produit commercial ou neuf) ou sur un support de transfert standard non marqué, comme une disquette, un CD-ROM ou une cartouche de bande magnétique ¼ pouces.

## 16.B. Équipement d'essai et de production

Aucune.

## 16.C. Matériaux

Aucune.

## 16.D. Logiciel

16.D.1. «Logiciel» spécialement conçu pour la modélisation, la simulation ou l'intégration de la conception des systèmes visés à l'article 1.A. ou des sous-systèmes visés.

### Notes techniques:

*La modélisation comporte en particulier l'analyse aérodynamique et thermodynamique des systèmes.*

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| •Australie      | •Canada               |
| •Chine          | •France               |
| •Allemagne      | •Inde                 |
| •Israël         | •Italie               |
| •Japon          | •Fédération de Russie |
| •Afrique du Sud | •République de Corée  |
| •Suède          | •Suisse               |
| •Royaume Uni    | •États-Unis           |

### Production globale



**Nature et But:** De nombreux changements de conception et environnements de vol peuvent être étudiés à l'aide de logiciels de modélisation, de simulation et de conception-intégration, réduisant ainsi les coûts de construction, de test et de reconception du matériel réel. Cette capacité de modélisation réduit considérablement le coût et le temps requis pour développer une fusée ou un UAV. Les modèles informatisés jouent un rôle essentiel dans la conception d'une fusée ou d'un drone avec la capacité de charge utile et portée souhaitée. C'est particulièrement vrai lors de la conception de missiles balistiques à plus longue portée. L'utilisation d'une modélisation logicielle complète pour valider les performances à l'étape de la conception permet d'obtenir des missiles avec les meilleurs choix possibles en matière de mission, notamment en termes de portée et de charge utile.

**Mode de fonctionnement:** La plupart des modèles logiciels de conception de missiles représentent la partie physique du fonctionnement des missiles. Les modèles aérodynamiques modernes peuvent offrir un traitement très précis des flux internes et externes au missile et peuvent être adaptés à la géométrie spécifique du missile à évaluer. Les modèles thermodynamiques prédisent à la fois l'échauffement aérodynamique et les réactions chimiques impliquées dans la propulsion et la protection thermique des missiles, ainsi que le transfert de chaleur qui en résulte dans les composants de missiles les plus sensibles. Les modèles à éléments finis sont maintenant couramment utilisés pour concevoir des structures de missiles, tout comme les modèles qui combinent le matériel du système de guidage et les assemblages de commandes de vol des missiles pour tester la performance du système. Un exemple de sortie d'un modèle de structure de missile est illustré à la Figure 151 ci-dessus.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le logiciel de conception de missile peut être appliqué tôt dans le processus de conception pour définir la configuration globale, les possibilités de poussée, les charges de vol aérodynamiques, les conditions structurales, les conditions d'isolation thermique et les exigences de guidage ou de commande des concepts ou des modèles de conception candidats. Les conceptions de matériel de sous-système basées sur ces modèles sont testées pour leur performance, souvent avec le logiciel de simulation intégré, pour valider leurs capacités et pour peaufiner les modèles afin de les rendre plus spécifiques à la conception.

**Autres usages:** Bon nombre des modèles logiciels les plus efficaces utilisés dans la conception des systèmes fusées ou d'UAV sont couramment utilisés dans le commerce. Un modèle structural répandu, NASTRAN, est utilisé pour concevoir des voitures, des camions, des avions de passagers et des ponts, pour ne citer que quelques exemples. Les codes thermodynamiques tels que SINDA sont utilisés pour concevoir des satellites, des centrales électriques et tous types de moteurs.

**Aspect (sortie d'usine)** Les logiciels de conception de missiles ne se distinguent pas physiquement des logiciels commerciaux. Il est contenu sur le même type de disque ou de CD-ROM d'ordinateur, etc. utilisé pour d'autres logiciels. Alternativement, le logiciel de missile et les modèles spécialisés de dynamique de vol peuvent être chargés sur un ordinateur purement numérique et en temps réel (émulateur de vol). Des modèles en temps réel peuvent être utilisés pour remplacer le matériel de l'article à tester dans la boucle.

**Aspect (à l'emballage):** Les logiciels spécialement conçus pour la conception de produits aérospatiaux et militaires sont souvent annoncés comme tels. Les modèles et les logiciels en temps réel sont généralement vendus comme tout autre produit logiciel et peuvent être vendus directement sur Internet. Dans le passé, les logiciels étaient emballés dans des boîtes en carton, éventuellement dans une pellicule rétractable (s'il s'agissait d'un produit commercial ou neuf) ou sur un support de transfert standard non marqué, comme une disquette, un CD-ROM ou une cartouche de bande magnétique de 1/4".

**Informations complémentaires:** Les ordinateurs numériques à grande vitesse peuvent constituer un levier considérable pour le développement de logiciels de vol de missiles en temps réel. Certaines normes informatiques commerciales sont assez rapides pour permettre des simulations en temps réel de la performance des missiles. L'ordinateur de mouvement de vol est l'intégrateur essentiel qui rend ces ordinateurs commerciaux utiles comme émulateurs pour le développement et les essais de logiciels de missiles. Les ordinateurs de mouvement de vol utilisent des logiciels de système d'exploitation spécialisés qui leur permettent d'agir comme contrôleurs de simulation et enregistreurs de données de performance de vol.

## 16.E. Technologie

### 16.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement»,

**Nature et But:** La technologie de modélisation, de simulation et d'intégration de la conception est la connaissance ou les données nécessaires à la conception des logiciels et des ordinateurs nécessaires au développement des missiles, des UAV, de leurs sous-systèmes et composants. Les logiciels de modélisation peuvent être utilisés pour la conception technique, les simulations de vol et pour faciliter les essais. La modélisation informatique implique une compréhension sophistiquée du domaine physique simulé. Un concepteur doit avoir une connaissance approfondie du système ou du sous-système de missiles, puis être capable de convertir cette connaissance en un modèle informatique, c'est-à-dire un logiciel de calculs mathématiques et de production de résultats numériques et graphiques. La précision du modèle s'améliorera à mesure que le concepteur acquerra de l'expérience grâce à l'expérimentation et aux essais dans le monde réel.



**Mode de fonctionnement:** La technologie de modélisation, de simulation et d'intégration de la conception est disponible sous de nombreuses formes. L'assistance technique peut se présenter comme un enseignement dispensé par une personne expérimentée dans la rédaction ou la modification d'un logiciel de modélisation, de conception ou de simulation de vol existant de qualité inférieure pour en faire un logiciel qui soutiendra la conception de systèmes de fusées ou d'UAV, ou une personne qui fait office de formateur dans une classe sur ou à proximité du site de production. Un pays peut recevoir une assistance technique d'un ou de plusieurs services de conseil spécialisés dans le logiciel de conception ou de modélisation; Enfin, un pays peut recevoir une assistance technique en envoyant des étudiants dans d'autres pays possédant la technologie nécessaire pour suivre une formation et mettre en pratique les compétences nécessaires pour construire et exploiter les systèmes requis. Tous les manuels et matériels reçus pendant la formation peuvent être considérés comme des données techniques.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La technologie nécessaire au développement de logiciels de modélisation ou de conception de fusées ou d'UAV est en partie spécialisée. Les fusées sondes utilisées dans la recherche météorologique sont, avec quelques ajustements mineurs, des missiles balistiques, et la technologie de modélisation et de conception utilisée dans les missiles balistiques et les fusées sondes est essentiellement la même.

**Autres usages:** Bien que la technologie nécessaire au développement de logiciels de modélisation ou de conception de fusées ou de véhicules aériens sans pilote soit en partie spécialisée, certaines peuvent généralement s'appliquer à de nombreuses autres applications. Les concepteurs d'UAV peuvent utiliser des versions du logiciel de conception et de modélisation utilisé dans l'industrie aéronautique civile et militaire.

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

## Catégorie II - Article 17: Furtivité

## Catégorie II - Article 17: Furtivité

## 17.A. Équipement, assemblages et composants

17.A.1. Matières servant à la réduction des éléments observables tels que la réflectivité radar et les signatures ultraviolettes/infrarouges et acoustiques (technologies de furtivité) en vue d'applications utilisables pour les systèmes visés aux articles 1.A. ou 19.A. ou les sous-systèmes visés à l'article 2.A. Ou 20.A.

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| •Brésil         | •Chine                |
| •France         | •Allemagne            |
| •Grèce          | •Israël               |
| •Italie         | •Japon                |
| •Pays Bas       | •Fédération de Russie |
| •Afrique du Sud | •Suède                |
| •Taiwan         | •Royaume Uni          |
| •États-Unis     |                       |

Production globale



**Nature et But:** La nécessité de protéger les missiles contre la détection, l'interception et la destruction a conduit à la mise au point de technologies visant à réduire les objets observables; lorsque la réduction des objets observables est l'un des principaux objectifs de conception d'un nouveau véhicule, on les appelle souvent de façon générique technologie "furtive". Les réflexions et les émissions sont réduites ou adaptées grâce à l'utilisation de formes et de matériaux spéciaux soigneusement conçus. D'autres dispositifs tels que les radars d'interception à faible probabilité peuvent être utilisés. L'objectif est de rendre l'objet difficile à détecter.

**Mode de fonctionnement:** Les émissions et les réflexions sont de nature acoustique ou électromagnétique. Les émissions sont réduites au minimum grâce à un large éventail de techniques telles que l'étalement de fréquence, l'isolation vibratoire, le blindage, le masquage, le guidage et l'amortissement.

Les émissions et réflexions électromagnétiques se produisent dans de nombreuses bandes de fréquences, y compris dans les bandes des micro-ondes (radar), des infrarouges (IR), du visible et des ultraviolets. Étant donné que la signature d'un véhicule varie considérablement d'une bande de fréquences à l'autre et même à l'intérieur d'une même bande, différentes méthodes doivent être appliquées à l'ensemble du spectre. Les émissions et les réflexions peuvent être éloignées de l'observateur et/ou réduites en amplitude ou modifiées en réponse en fréquence à l'aide de formes et de matériaux soigneusement sélectionnés. Cette réduction est obtenue par la mise en forme, le matériau ou des dispositifs permettant de contrôler les émissions, la réflectance, l'absorption et la seconde surface (isolants et réflecteurs ajoutés). Ces techniques ou dispositifs dissimulent ou dissimulent la véritable nature de l'objet à l'observateur ou permettent au véhicule d'être détectable seulement à certains angles et à de brefs intervalles, ce qui retarde ou évite la détection et l'engagement.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La technologie furtive est utilisée pour rendre les missiles balistiques, les véhicules aériens sans pilote (UAV), y compris les missiles de croisière, et leurs charges utiles plus difficiles à détecter, à suivre, à identifier et à engager par des systèmes d'armes défensifs. La plupart des éléments de conception de ces systèmes sont soumis à un traitement par technologie furtive, y compris leur forme de base, leurs composants structurels, leurs surfaces et leurs bords d'attaque, ainsi que leurs entrées et leurs ouvertures (Figure 152).



Schéma 152: Une image d'un véhicule supposé être un UAV indétectable, en fonction de sa piste (Aviation Week)

**Autres usages:** La plupart des matériaux utilisés pour le contrôle des signatures ont été développés à l'origine pour les avions militaires et se retrouvent sur les systèmes à voilure fixe et rotative. Les matériaux absorbants pour radar sont également largement utilisés dans les installations d'essai des radars. Des versions modifiées des matériaux et des techniques de traitement se trouvent à bord de certains navires, sous-marins et véhicules de combat terrestre et tactiques. La technologie des matériaux antiémissions est également utilisée pour contrôler les températures dans les satellites. Plusieurs dispositifs peuvent être utilisés avec des appareils de communication pour réduire la détectabilité. Il existe des utilisations commerciales pour certains des matériaux à faible coût et à faible rendement pour réduire les interférences électromagnétiques et la charge solaire.

**Aspect (sortie d'usine)** Les dispositifs typiques qui entraînent une réduction des traitements observables comprennent, sans toutefois s'y limiter, les catégories suivantes:

Il existe deux types de *charges conductrices*: les fibres conductrices, qui ressemblent à des mèches très légères de 2 à 6 mm de long, sont faites de carbone, de métaux ou de fibres de verre revêtues d'un matériau conducteur, et les particules revêtues de matériau conducteur, qui peuvent ressembler au sable coloré.

*Les écumes à petites alvéoles*, ouvertes et fermées, sont peintes ou chargées d'encre et de peintures absorbantes. Ces écumes ressemblent à des feuilles de caoutchouc mousse souple ou à des filtres de climatisation. Ils peuvent être monocouches ou multicouches, avec des lignes de colle séparant les strates. Un plan de masse, s'il est appliqué, peut être constitué d'une peinture métallique, d'une feuille métallique (feuille d'aluminium ou plastique mince métallisé) ou d'encre pulvérisées indétectables. Certains fabricants peuvent marquer l'avant de ces mousses avec un lettrage indiquant "avant" ou avec des numéros de série si le plan de masse n'est pas évident. Certaines mousses peuvent contenir des fibres composites pour les rendre plus rigides ou même structurelles. Quatre de ces mousses sont illustrées à la Figure 153.

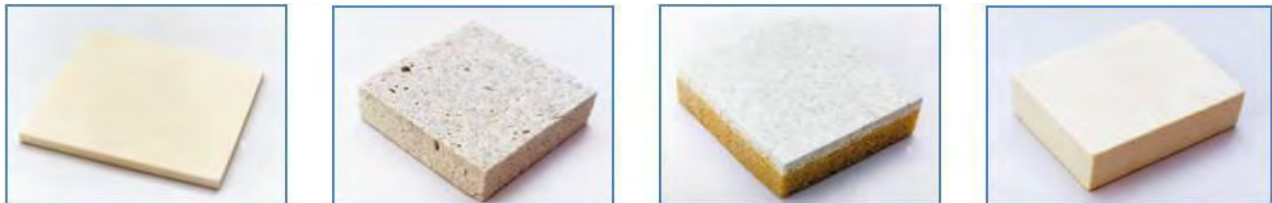


Schéma 153: Quatre écumes à matériau absorbant pour radar, dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du coin supérieur gauche: mousse faiblement diélectrique (époxyde); mousse légère à pertes (uréthane); mousse légère pulvérisable (uréthane); et mousse thermoplastique (polyétherimide). (Équipement de MTCR, manuel d'annexe de logiciel et de technologie, troisième édition (mai 2005))

*Les cartes résistives* (R-Cards) se composent d'une feuille de papier de fibre ou de plastique très fin (Figure 154) couvert d'un enduit continu d'une encre conductrice, peinte ou d'un film métallique extrêmement fin. La résistivité électrique de surface du revêtement peut être constante ou varier en continu dans une ou deux directions. Les versions à encre conductrice sont susceptibles d'être gris foncé à noir. Les versions à revêtement métallique peuvent varier en couleur en fonction selon les métaux spécifiques

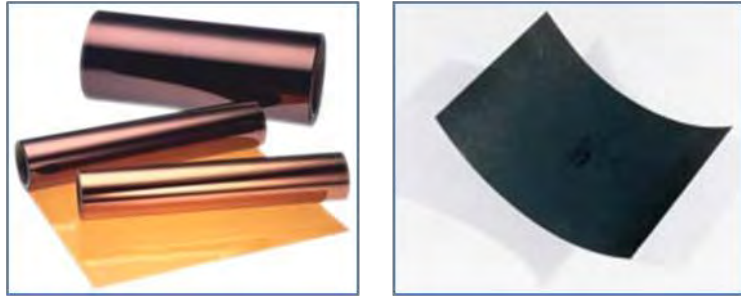


Schéma 154: Le film de polyamide de Kapton (à gauche) est souvent employé dans la fabrication des cartes résistives, telles que celles de la droite. (Crédit d'image de film de Kapton: PSG Ltd)

utilisés et les épaisseurs impliquées, mais les teintes noire, jaune, verte et dorée sont communes.

*Les tuiles céramiques chargées à pulvériser* sont des revêtements céramiques pulvérisés et cuits fortement chargés de charges électroconductrices ou de particules ferromagnétiques. Elles sont susceptibles d'avoir une couleur allant du gris foncé au noir. Selon le mastic et le vernis d'étanchéité utilisés, leur texture de surface peut varier de lisse à abrasif. L'épaisseur des revêtements projetés peut varier de quelques millimètres à plusieurs dizaines de centimètres.

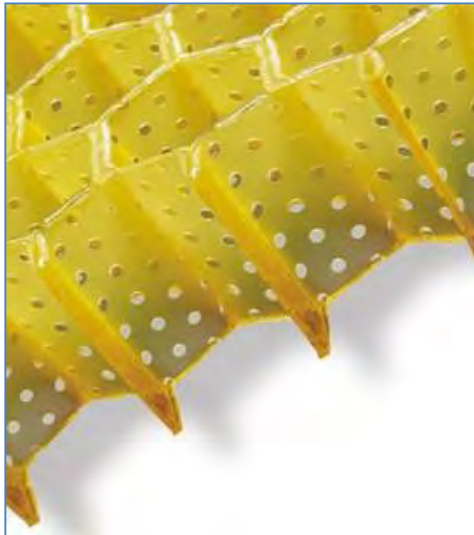


Schéma 155: Le Nid d'abeilles absorbant a une série d'applications en matière de défense et d'aérospatial, y compris la furtivité (Supracor)

*Le nid d'abeilles absorbant* est un matériau composite léger avec des cellules ouvertes normalement de 3 à 12 millimètres de diamètre et de 25 à 150 millimètres d'épaisseur maximum. Il est traité avec des encres, de la peinture, ou des fibres partiellement conductrices. Le noyau en nid d'abeilles peut être embarqué sans être chargé, dans ce cas il ne pourrait pas être discerné des matières utilisées seulement pour des raisons structurales. Les encres et les peintures conductrices pour le chargement suivant sont susceptibles de venir d'une source entièrement différente du noyau lui-même. Le nid d'abeilles absorbant est montré sur la Figure 155.

**Aspect (à l'emballage):** *La longueur des fibres absorbantes* varient de 2 à 6 millimètres. Les fibres sont habituellement empaquetées dans des sachets en plastique, des fioles, ou des pots. Leur poids dépend des matières utilisées. Les fibres expédiées avant d'être coupées en morceaux à leur longueur fonctionnelle peuvent être sous forme de bobines conventionnelles de fibres de textile ou de lot de 1 à 2 m de longueur et de 2 à 10 cm de diamètre.

*Les écumes* viennent en feuilles habituellement pas plus larges que 1 m x 1 m, s'étendant de 6 à 200 millimètres d'épaisseur, et pesant moins de 40 g par mètre carré. Elles sont empaquetées dans des boîtes en carton.

*Les cartes R* sont empaquetées dans une enveloppe ou une boîte avec une feuille de papier non-abrasive entre chaque carte. De plus grandes quantités peuvent être expédiées en rouleaux de 0,2 à 1 m de longueur et de 15 cm de diamètre, à l'intérieur de tubes desséchés ou dans des boîtes en carton. *Les tuiles pulvérisables en céramique chargées* sont habituellement des bulles enveloppées et emballées dans des boîtes en carton. *Le nid d'abeille absorbant* est expédié dans des boîtes en carton.

## 17.B. Équipement d'essai et de production

17.B.1. Systèmes spécialement conçus pour mesurer la surface équivalente radar, utilisables pour les systèmes visés aux articles 1.A, 19.A.1. ou 19.A.2. ou les sous systèmes visés à l'article 2.A.

- France
- Israël
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Royaume Uni
- Allemagne
- Japon
- Suède
- États-Unis

Production globale



**Nature et But:** L'équipement de mesure de la surface radar (SER) a été développé pour évaluer, adapter et réduire le SER des systèmes de missiles afin d'en réduire la détectabilité par les radars de défense aérienne. Les appareils de mesure SER peuvent être utilisés à l'intérieur ou à l'extérieur. De nombreuses gammes sont utilisables à la fois à des fins militaires et commerciales. L'équipement de mesure SER peut être utilisé pour évaluer des échantillons de matériaux, des composants de missiles, des modèles réduits de missiles et des systèmes de fusées ou d'UAV réels.

**Mode de fonctionnement:** Un objet testé, souvent appelé la cible, est positionné ou suspendu dans une zone de test avec peu ou pas d'autres objets afin de réduire au minimum les sources de diffusion radar étrangères. La cible est ensuite

éclairée de façon répétée par le radar sur une gamme choisie de fréquences radar d'amplitude connue, et les réflexions sont mesurées. Les données obtenues sont évaluées et la réflectivité radar de la cible en fonction de la fréquence et de l'angle de vision est déterminée.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Cet équipement est nécessaire pour déterminer, adapter et réduire la signature radar d'une fusée, d'un UAV, ou d'une charge utile. Ces systèmes de mesure permettent également d'évaluer les performances modélisées par ordinateur et de déterminer si les missiles ont les observables réduits et adaptés souhaités. Certains équipements SER sont utilisés pour caractériser les matériaux absorbant les ondes radar.

**Autres usages:** Les systèmes de mesure SER peuvent être utilisés pour déterminer la signature radar de tout véhicule militaire aérien, maritime ou terrestre. Les mesures fournissent des informations qui aident à adapter ou à réduire le SER. Les plages de mesure du SER intérieur peuvent être adaptées pour mesurer les diagrammes de performance des antennes pour diverses applications commerciales telles que les téléphones cellulaires, les antennes d'automobile et les antennes paraboliques.

**Aspect (sortie d'usine)** Les éléments de base d'une aire d'essai intérieure de la SER (un exemple est illustré à la Figure 156) comprennent l'équipement de source radar, les réflecteurs doubles, les dispositifs de soutien de cible et voûtes bidirectionnelles.



*Équipement de source radar:* L'équipement RF est une collection d'équipements électroniques montés en rack qui, une fois assemblés, occupent l'espace d'un classeur et sont utilisés dans tous les types de systèmes de mesure SER.

Des convertisseurs haut/bas avec des klaxons d'alimentation assurent l'éclairage radar. Pour fournir une large gamme de fréquences, les cornes d'alimentation coniques varient en diamètre de 1 cm à 100 cm en largeur interne. La longueur de la corne d'alimentation est généralement deux fois et demie la largeur intérieure. Ils sont revêtus de métal et peuvent recevoir un câble coaxial ou un guide d'ondes à l'arrière. Dans les systèmes de mesure SER, les sources d'alimentation radar peuvent être remplacées par une source radar provenant d'un système radar commercial (p. ex. un radar marin). Les analyseurs de réseau peuvent mesurer l'absorption et la réflexion, et sont couramment utilisés commercialement pour développer des antennes et des matériaux de blindage contre les interférences électromagnétiques. Le câblage RF est un câblage coaxial à faible perte et est nécessaire pour connecter les composants. Ces câbles varient en longueur, mais ont normalement un diamètre de 1 cm à 2 cm et ont une surface extérieure en treillis métallique.



**Schéma 155: Le Nid d'abeilles absorbant à une série d'applications en matière de défense et d'aérospatial, y compris la furtivité (Supracor)**

*Réflecteurs doubles:* Les systèmes de mesure Cassegrain emploient deux grandes plaques ou plats de différentes dimensions comme réflecteurs; ils peuvent être circulaires, elliptiques ou rectangulaires. Les plaques peuvent avoir des marques de calibrage sur plusieurs parties des surfaces et peuvent être peintes. Les réflecteurs peuvent être assemblés à partir de pièces et peuvent être composés de bords laminé ou dentelé. Pour mesurer la SER d'un missile typique de croisière, les deux réflecteurs ont une épaisseur de 2 à 5 cm, et leurs principaux axes ont une longueur de 4 m et de 5 m. Ces réflecteurs créent une mesure de «point idéal» de 2 m de diamètre. Ce type de système est presque invariablement employé pour des mesures intérieures. Il convient de noter qu'un système de mesure pourrait être conçu pour utiliser un réflecteur simple.

*Dispositifs de soutien de cible:* Ces dispositifs supportent la cible au-dessus du plancher ou du sol et de la trace radar; ils doivent être aussi imperceptibles au radar que possible. Les colonnes de

mousse de polystyrène, les lames en métal enduites de matériaux absorbant les ondes radar (RAM), et les cordes de marionnette des bâtis aériens sont des méthodes communes de support et de suspension des cibles à mesurer. Les colonnes de mousse de polystyrène peuvent avoir 2 à 5 m de hauteur et 0,5 à 2 m de diamètre. Leur section transversale horizontale peut être ronde (avec ou sans le cône), carrée, triangulaire ou en forme de diamant. Les lames en métal ou les pylônes peuvent varier de 2 à 40 m de longueur avec une mesure de 5 cm x 30 cm à sa partie supérieure; les pylônes courts mesurent 50 cm x 90 cm à sa partie inférieure tandis que les grands pylônes mesurent 2 m x 8 m dans sa partie inférieure. Les colonnes de mousse de polystyrène et les pylônes peuvent être montés sur un mécanisme qui les incline vers l'avant. Les interfaces tournantes peuvent également tourner la colonne de mousse de polystyrène et la cible. Des ensembles de trois à cinq colonnes de mousse de polystyrène montés sur une plaque tournante commune peuvent être utilisés pour soutenir et tourner une cible. Quelques pylônes ont également une interface tournante avec la cible au-dessus.

*Les voûtes bidirectionnelles* Une autre approche de mesure de la SER de missile est d'employer une voûte bidirectionnelle qui peut être fabriquée à partir de contreplaqué, de fibre de verre ou de métal. Un système d'entraînement à moteur électrique est employé pour replacer les cornets d'alimentation le long de la voûte. Le câblage personnalisé relie la voûte à un ordinateur pilote (normalement un PC avec un clavier et un moniteur) ainsi qu'aux commandes d'alimentation. Un article d'essai, avec sa surface perpendiculaire au plan défini par la voûte,

est placé au centre de la voûte. Les articles mesurent généralement 0,3 à 1,0 m de côté.

La référence de calibrage est une plaque métallique plate aux dimensions identiques à celles de l'article d'essai.

**Aspect (sortie d'usine)** Les systèmes de mesure SER à tunnel de transmission/réflexion ressemblent à de grands conduits d'aération en tôle. Ils sont équipés de deux cornets d'alimentation en métal assortis avec câblage coaxial ou guides d'ondes menant à la source radar et à l'électronique de mesure du détecteur. Ils sont contrôlés par un ordinateur qui ressemble à n'importe quel PC avec un clavier et un moniteur. Il peut y avoir de la mousse absorbant les ondes radar (normalement de couleur bleu moyen ou noire et pointue à la surface) insérée dans certaines parties de la gaine. Les systèmes intérieurs à éclairage direct et les systèmes extérieurs à rebondissement utilisent des réflecteurs radars paraboliques de forme conventionnelle dont la taille varie de quelques centimètres à 10 m de diamètre.

**Aspect (à l'emballage):** Les gammes de radars sont rarement expédiées en une seule pièce; elles sont plutôt assemblées sur place à partir de nombreux composants. Il n'y a pas d'exigences uniques en matière d'emballage pour cet équipement, autres que celles de la norme de l'industrie pour les composants électroniques montés en rack et les composants informatiques commerciaux. Certains composants (comme les réflecteurs Cassegrain) peuvent être assez grands et nécessitent des caisses spéciales. Les supports de cibles en polystyrène expansé sont délicats et doivent être emballés de façon à éviter les bosses.

## 17.C. Matériaux

17.C.1. Matières servant à la réduction des éléments observables tels que la réflectivité radar et les signatures ultraviolettes/infrarouges et acoustiques (technologies de furtivité) en vue d'applications utilisables pour les systèmes visés aux articles

1.A, ou 19.A. et dans les sous-systèmes visés par l'article 2.A.

**Notes:**

1. L'article 17.C.1. couvre les matières de structure et les revêtements (y compris les peintures) spécialement conçus pour réduire ou adapter la réflectivité ou l'émissivité dans les bandes micro-onde, infrarouge ou ultraviolet du spectre électromagnétique.

2. L'article 17.C.1. ne s'applique pas aux revêtements utilisés spécialement pour l'isolation thermique des satellites.

**Nature et But:** La nécessité de protéger les missiles balistiques et les UAV (y compris les missiles de croisière) contre la détection et la destruction a conduit à la mise au point de technologies permettant de réduire leurs caractéristiques observables en utilisant des matériaux spéciaux soigneusement conçus pour absorber l'énergie radar ou protéger ou masquer le véhicule des systèmes radar ou de détection qui pourraient être en service. L'objectif est de rendre le missile ou l'UAV difficile à détecter.

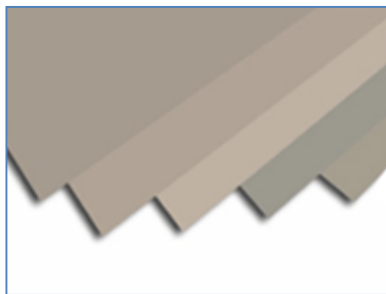
**Mode de fonctionnement:** Les émissions sont également réduites au minimum par d'autres techniques, telles que le blindage, le masquage, le guidage et l'amortissement. Les émissions et les réflexions peuvent être affectées à l'aide de matériaux soigneusement sélectionnés appliqués sur la cellule. Cette réduction est obtenue par la mise en forme de matériaux pour des émissions, une réflectivité, une absorption et une seconde surface (isolants et réflecteurs ajoutés) contrôlées. Ces techniques ou dispositifs dissimulent ou dissimulent la véritable nature de l'objet aux dispositifs de détection ou permettent au véhicule d'être détectable seulement à certains angles et à de brefs intervalles.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La technologie furtive est utilisée pour rendre les missiles balistiques, les UAV (y compris les missiles de croisière) et leurs charges utiles plus difficiles à détecter, suivre, identifier et engager pour les systèmes d'armes défensifs. La plupart des éléments de conception d'un missile sont soumis à un traitement furtif, y compris sa forme de base, ses éléments structurels, ses surfaces et ses bords d'attaque ainsi que ses entrées et sorties.

**Autres usages:** La plupart des matériaux utilisés pour le contrôle des signatures ont été développés à l'origine pour les avions militaires et se retrouvent sur les systèmes à voilure fixe et rotative. Des versions modifiées des matériaux et des techniques de traitement se retrouvent sur certains navires, sous-marins et véhicules terrestres. La technologie des matériaux antiémissions est également utilisée pour contrôler les températures dans les satellites. Il existe des utilisations commerciales pour certains des matériaux à faible coût et à faible rendement pour réduire les interférences électromagnétiques et la charge solaire.

**Aspect (sortie d'usine)** Les matériaux typiques qui entraînent une réduction des traitements observables comprennent, sans toutefois s'y limiter, les catégories suivantes:

*Les pulvérisateurs* incluent les encres ou les peintures conductrices, contenant normalement de l'argent, du cuivre, du zinc, du bronze, ou de l'or comme ingrédients de base. Ils peuvent apparaître comme étant de couleurs noir, gris métallisé, cuivre, bronze ou or.



**Schéma 157: RAM magnétique de résine époxyde machiné sur commande (MSM Industries)**

*Le matériau absorbant pour radar magnétique* (communément appelé Mag RAM), tel qu'il est appliqué sur les véhicules, peut se présenter sous des formes telles que des revêtements de surface, des bords moulés ou des remplisseurs d'interstices. Il se compose de particules ferromagnétiques ou de ferrite à grain très fin en suspension dans divers liants à base de caoutchouc, de peinture ou de résine plastique. Il peut être appliqué sous forme de sprays, de feuilles, de pièces moulées ou usinées ou de mastics. En raison des couleurs générales des liants et des particules ferromagnétiques typiques, les couleurs naturelles de Mag RAM vont du gris clair ou brun au presque noir (Figure 157); cependant, avec des pigments supplémentaires ajoutés pour d'autres raisons (par exemple, camouflage visuel ou codage fabrication/entretien), presque toute couleur est possible. Les films minces

en matière plastique ou en papier peuvent recouvrir l'un ou les deux côtés des feuilles pour le codage d'identification ou le maintien de la propreté de la surface avant l'application. L'épaisseur de la tôle peut varier de moins d'un millimètre à plusieurs centimètres. La densité du matériau est susceptible de varier de 50% à 75% de fer solide.

*Le matériel absorbant les ondes radar transparentes* (T-RAM) ressemble au polycarbonate de feuille. Il est normalement transparent de 75 à 85 % dans le spectre visible. Les matériaux absorbants peuvent être des fibres ou des sphères répandues dans tout le matériel jusqu'à des enduits minces qui ressemblent à de la teinte métallique pour fenêtre de couleur jaune/verte.

*Les traitements infrarouges (IR)* sont généralement constitués de peintures et de revêtements. Souvent, ces revêtements sont personnalisés pour adapter la réflectivité et/ou le rayonnement de l'énergie IR. En raison du large spectre (de 0,8 micron à 14,0 microns de longueur d'onde) de l'énergie IR et de la variété des applications, les revêtements IR peuvent être réfléchissants (faible émissivité) ou conçus pour absorber (forte émissivité). Les revêtements utilisés pour le traitement IR comprennent des peintures militaires spécialement conçues dans des couleurs de camouflage ou des peintures commerciales conçues pour réfléchir la chaleur solaire. Certains de ces produits ont une teneur notable en métal dans les peintures/liants en raison des pigments IR utilisés. D'autres sont

conçus pour avoir une émissivité élevée et, à ce titre, contiennent des pigments qui absorbent l'IR. Ces revêtements à haute émissivité contiennent des pigments à base de carbone ou d'autres pigments à base de particules très émissives (normalement presque noirs). Dans les deux cas, ces pigments IR sont parfois expédiés séparément de la peinture/du liant.

**Aspect (à l'emballage):** Les peintures aérosol et les encres sont généralement expédiées dans des boîtes de taille standard. Les boîtes peuvent se trouver dans des boîtes contenant des dessiccants, ou les pigments et les liants peuvent être expédiés séparément. Les pigments sont expédiés dans des pots, des sacs en plastique ou des contenants, et les liants sont expédiés en boîtes ou en fûts. La plupart sont des matières hautement toxiques ou caustiques jusqu'à ce qu'elles soient appliquées et durcies.

Mag RAM peut être expédié sous forme de feuilles, de pâtes non durcies et de pièces finies, ou sous forme de matières premières (particules, liant et activateur de polymérisation expédiés séparément), les particules seraient probablement expédiées sous forme de poudre très fine ou de fibres courtes mais aussi éventuellement immergées dans un fluide hydrophobe pour éviter leur rouille. Il peut être expédié en feuilles jusqu'à quelques mètres de longueur et de largeur. L'épaisseur de la tôle peut varier de moins d'un millimètre à des dizaines de centimètres. Il peut être expédié en plusieurs couches sur des palettes plates ou sous forme de feuille roulée à l'intérieur d'un tube en carton. S'il est expédié sous forme de pièces moulées, il peut être dans des boîtes rectangulaires en carton ou en bois de 0,1 m x 0,1 m x 2,0 m ou de 20 cm x 20 cm x 20 cm.

T-RAM est emballé comme une feuille de polycarbonate ou comme une partie de fenêtre ou de verrière. Il peut être recouvert d'un papier protecteur adhésif appliqué à l'extérieur. S'il était expédié en petits morceaux, il serait emballé dans une boîte.

Les pigments de peinture IR peuvent être emballés dans des boîtes, des flacons ou des sacs en plastique. Les peintures et revêtements thermiques IR sont généralement emballés dans des contenants comme tout autre produit de peinture.

## 17.D. Logiciel

17.D.1. «Logiciel» conçu pour la réduction des éléments observables tels que la réflectivité radar et les signatures ultraviolettes/infrarouges et acoustiques (technologies de furtivité) en vue d'applications utilisables pour les systèmes visés aux articles 1.A. ou 19.A. ou les sous-systèmes visés à l'article 2.A.

**Note:**

*L'article 17.D.1. couvre les «logiciels» spécialement conçus pour analyser la réduction de signatures.*

**Nature et But:** Concevoir et établir des matériaux et des systèmes avec réduction de la signature exige normalement un logiciel et des bases de données pour l'analyse de ces matériaux et systèmes. Le logiciel et les bases de données spécialement conçus pour l'analyse de la réduction de la signature sont contrôlés. Ces bases de données et logiciel incluront des données ou des fonctions essentielles à l'analyse des possibilités de diminution de la signature des systèmes et des matériaux.

- France
- Israël
- Japon
- République de Corée
- Royaume Uni
- États-Unis
- Allemagne
- Italie
- Fédération de
- Suède

Production globale



**Mode de fonctionnement:** Les émissions et les réflexions peuvent prendre de nombreuses formes telles que l'acoustique, les radiofréquences (p. ex. radar), la lumière visible ou l'énergie infrarouge. Un logiciel permet de modéliser mathématiquement ces effets physiques en fonction de la forme d'un objet et de ses propriétés de surface. Les matériaux de construction, y compris les revêtements, influent sur les propriétés de surface. Les logiciels et/ou bases de données contrôlés contiennent des informations ou des méthodologies spécialement conçues pour l'analyse des émissions et de la réflectivité (signatures). Les logiciels et les bases de données peuvent être utilisés pour analyser les systèmes en développement ou existants afin de déterminer l'efficacité des matériaux et des dispositifs déjà en place ainsi que pour déterminer les secteurs qui ont besoin d'être améliorés.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Ces éléments sont utilisés pour analyser la forme de la cellule et les matériaux utilisés dans les missiles balistiques et les drones (y compris les missiles de croisière), afin de sélectionner des traitements réduisant la signature ou d'identifier les zones sensibles (domaines pouvant être améliorés). De même, ces éléments peuvent être utilisés pour évaluer la signature des systèmes, quantifier la performance des conceptions et des choix de matériaux dans les systèmes, et évaluer les domaines à améliorer.

**Autres usages:** Des logiciels et des bases de données identiques ou similaires peuvent être utilisés pour analyser et concevoir la réduction des signatures sur de nombreux articles militaires - y compris les véhicules terrestres, les appareils avec pilote et les navires. Des logiciels destinés à modéliser des effets physiques similaires peuvent être utilisés pour l'analyse des systèmes de gestion de l'énergie des satellites et des bâtiments, en particulier les émissions infrarouges liées aux contrôles thermiques. Les détecteurs passifs et actifs utilisés pour les systèmes d'alarme de sécurité et les systèmes autonomes tels que les voitures à conduite automatique peuvent également nécessiter une analyse à l'aide de logiciels et de bases de données similaires.

**Aspect (sortie d'usine):** Les logiciels pour les outils de conception de réduction de signature peuvent être emballés sur des disquettes, des bandes, des lecteurs flash USB et des disques compacts. Il est également possible d'utiliser un réseau informatique pour distribuer électroniquement les logiciels et leur documentation.

**Aspect (à l'emballage):** Historiquement, les logiciels sur disquettes, cassettes, lecteurs flash USB et disques compacts ont été emballés dans une grande variété de paquets, pochettes, étuis, publipostages ou boîtes. Le logiciel peut également être emballé avec du matériel connexe. Au XXIe siècle, il est très probable que les logiciels soient transférés directement sur Internet.

**Informations complémentaires:** L'analyse en vue de réduire les observables est plus une activité de niche que d'autres types d'analyse tels que les éléments finis (structures) et l'écoulement des fluides (aérodynamique, etc.). En l'absence d'utilisations finales non militaires généralisées, il est moins probable que les logiciels destinés à des observables réduits soient annoncés et vendus commercialement.

Chaque spectre ou partie de spectre peut avoir son propre logiciel de conception spécifique. De nombreux pays et sous-traitants de la défense ont développé des codes informatiques pour l'analyse unidimensionnelle, bidimensionnelle ou tridimensionnelle et l'optimisation de la conception. Dans le spectre des radiofréquences (RF)/radars, tout code pouvant modéliser des antennes ou radomes peut être modifié et utilisé comme outil de coupe transversale radar. En règle générale, tout nom de code de logiciel qui comprend les lettres SIG, RF ou SER doit être considéré comme un code SER suspect. Les codes qui s'exécutent sur les ordinateurs personnels peuvent fournir des conseils utiles en matière de conception. Lorsque des matériaux exotiques et des formes complexes entrent en jeu, les supercalculateurs et les codes spécialement conçus deviennent particulièrement précieux.

Les éléments clés des codes de conception SER comprennent la capacité de définir le profil de la surface d'un véhicule à l'intérieur d'une marge adéquate (qui peut être aussi petite que 1/20 d'une longueur d'onde de la fréquence d'intérêt la plus élevée); la capacité de représenter de très petits éléments de la surface comme vecteurs et la capacité de calculer les mathématiques associées à la perméabilité magnétique et la permittivité électrique. Ces éléments indiquent la valeur des codes à usage général et des machines capables d'inverser et de manipuler rapidement de très grandes matrices de nombres.

Les codes thermiques infrarouges spécialisés pour les objets observables réduits peuvent être moins facilement disponibles ou matures, mais il existe des codes commerciaux qui peuvent être utilisés ou modifiés pour des applications militaires. Ces codes comprennent ceux utilisés pour le contrôle de la qualité thermique. Comme pour la RF, un code capable de représenter vectoriellement la taille et l'orientation des éléments de surface est un point de départ critique. Des codes estimant la transmission atmosphérique du rayonnement IR à différentes altitudes, saisons et types d'environnements gazeux sont utilisés dans le processus de conception. Les codes utiles pour déterminer le transfert de chaleur dans les aéronefs sont essentiels pour déterminer les températures de surface et les flux de chaleur résultant du fonctionnement des moteurs et d'autres sous-systèmes internes. Il s'agit généralement de codes permettant de déterminer la température du panache à partir du volume des produits de combustion qui passent dans le tuyau d'échappement et qui se dilatent et se dissipent dans l'atmosphère. La modélisation du panache, qui peut être effectuée pour les gaz d'échappement de la propulsion des fusées ou de la propulsion par respiration d'air, implique souvent des codes de pont moteur, mais va au-delà de leur utilisation pour déterminer les performances de la propulsion. Les codes qui utilisent les coefficients d'émissivité et de réflexion bidirectionnelle des matériaux comme entrées peuvent indiquer leur utilisation potentielle dans la conception du contrôle de signature IR.



## 17.E. Technologie

17.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de matières mentionnés aux articles 17.A, 17.B, 17.C ou 17.D.

**Note:**

*L'article 17.E.1. comprend les données spécialement conçues pour analyser la réduction de signatures.*

**Nature et But:** La technologie furtive est une science relativement nouvelle et peu répandue. La technologie, telle qu'elle est utilisée dans la présente section, est la fourniture d'une aide ou d'une assistance importante à un pays qui s'emploie à mettre au point les moyens de réduire la signature des UAV (missiles de croisière compris) et éventuellement des missiles balistiques. Dans la présente section, le transfert de revêtements spéciaux tels que T-RAM, Mag RAM, fibres conductrices ou autres matériaux peu observables serait évidemment un transfert critique, tout comme le transfert de la technologie pour produire ces matériaux. Fournir à un pays la technologie nécessaire pour produire l'équipement d'essai SER ou les informations nécessaires à la construction d'un champ d'essai SER serait un transfert d'informations techniques contrôlés.

**Mode de fonctionnement:** L'assistance technique est disponible sous plusieurs formes. L'assistance technique peut consister en un enseignement dispensé par une personne expérimentée dans une ou plusieurs matières contrôlées (telle que la technologie des éléments peu observables) qui agit comme formateur dans une classe sur le site de production ou à proximité. Un pays peut recevoir une assistance technique d'un ou de plusieurs services de conseil spécialisés dans une compétence de production particulière. Un pays peut également recevoir une assistance technique pour l'acquisition d'équipements, de machines ou de matériel techniques, ou pour l'identification des entreprises et des matériaux à acquérir. Enfin, un pays peut recevoir une assistance technique en envoyant des étudiants dans d'autres pays possédant la technologie nécessaire pour suivre une formation et mettre en pratique les compétences nécessaires à la construction des systèmes requis.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** À quelques exceptions près, l'assistance technique nécessaire à la construction d'équipements et d'installations d'essai produisant des matériaux furtifs n'est utilisée qu'à ces fins.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

# ARTICLE 18 - Protection contre les effets nucléaires

## Catégorie II - Article 18: Protection contre les effets nucléaires

## 18.A. Équipement, assemblages et composants

18.A.1. «Microcircuits» «résistant aux rayonnements» permettant de protéger les systèmes de fusées et les véhicules aériens sans pilote contre les effets nucléaires (par exemple, impulsion électromagnétique consécutive à une explosion atomique, rayons X, effets de souffle et effets thermiques combinés), et utilisables avec les systèmes visés à l'article 1.A.

- France
- Japon
- Suède
- États-Unis
- Israël
- Fédération de Russie
- Royaume Uni

Production  
globale



**Nature et But:** Les environnements spatiaux et sous-spatiaux exigent des technologies spécialisées qui réduisent les risques d'exposition aux rayonnements ionisants provenant des particules chargées énergétiques et des rayons X. Les rayonnements ionisants provoquent deux mécanismes de dommages critiques dans les microcircuits et peuvent affecter leur capacité à fonctionner correctement. Un effet cumulatif du rayonnement, connu sous le nom de dose ionisante totale (DIT), se rapporte à l'accumulation d'une charge électrique permanente dans un circuit, qui perturbe sa capacité de réponse ou provoque sa défaillance complète. L'ampleur de cette accumulation dépend de la mesure dans laquelle le circuit

est exposé au rayonnement. Le second effet, dû à la charge déposée par une seule particule ionisante, est connu sous le nom d'effet d'événement unique (EEI). Quelques EEI tels que les transitoires à événement unique (SET) et les perturbations à événement unique (SEU) sont temporaires et peuvent être récupérés. D'autres, comme le verrouillage à événement unique (Single-Event Latch-up - SEL), entraînent des dommages permanents. La sensibilité d'un appareil aux EEI dépend de la rapidité avec laquelle le rayonnement est délivré au circuit (nombre d'événements/particules par cm<sup>2</sup>). L'un des moyens de protection des circuits contre de tels effets est de rendre des microcircuits intrinsèquement résistants à toute la dose de rayonnements ionisants, un processus connu sous le nom de 'durcissement'.

**Mode de fonctionnement:** Les micro circuits durcis (Figure 158) sont similaires en fonctionnement et en apparence aux microcircuits ordinaires. Les stratégies d'atténuation visant à réduire les effets de la DIT et de l'ESS sont connues sous les noms de techniques de durcissement par irradiation par procédé (RHBP) et de durcissement par irradiation par conception (RHBD). Il est possible d'obtenir un RHBP en modifiant les profils de dopage dans les dispositifs et les substrats et en optimisant les processus de dépôt des isolants. Les techniques RHBD comprennent la redondance des registres, la redondance au niveau du loquet, la rétroaction de la porte logique OU et d'autres circuits de disposition. Les dispositifs



Schéma 158: Un circuit intégré spécifique à l'application (ASIC) durci par rayonnement, conçu pour des applications à haute fiabilité et à forte intensité de rayonnement. (Aeroflex)

conçus et fabriqués avec ces stratégies d'atténuation augmentent considérablement le coût d'un microcircuit durci et tendent également à réduire les taux d'exploitation numérique.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les microcircuits durcis par rayonnement utilisés dans les missiles balistiques sont conçus pour fonctionner dans un environnement nucléaire. Les véhicules aériens télépilotes (UAV), autres que certains missiles de croisière, ne sont généralement pas protégés contre les rayonnements ionisants parce que leur capacité de survie n'a pas été considérée.

**Autres usages:** Des dispositifs durcis contre le rayonnement sont utilisés dans un vaisseau spatial pour des missions de longue durée, y compris dans la télécommunication, les missions militaires, les satellites scientifiques et météorologiques, les stations spatiales, et les sondes planétaires. Les microcircuits durcis au sol sont également utilisés dans des environnements à fort rayonnement tels que la sécurité, l'instrumentation, le contrôle, les détecteurs et la robotique pour les réacteurs nucléaires et les accélérateurs de particules à haute énergie physique.

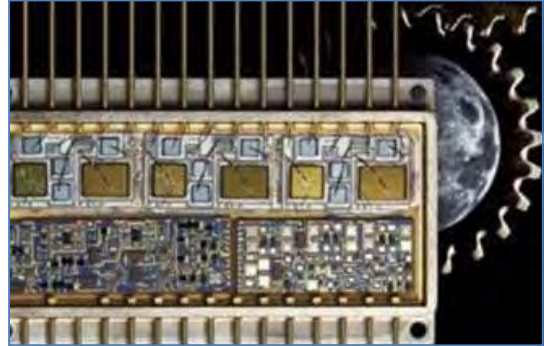


Schéma 159: Circuit d'attaque de moteur durci par rayonnement conçu pour les applications militaires et aérospatiales à forte intensité de rayonnement. (Aeroflex)

**Aspect (sortie d'usine)** Des dispositifs durcis de composant électronique et leurs assemblages sont typiquement montés dans du métal hermétiquement scellé ou des paquets en

céramique avec des dispositifs montés à la surface courants dans des assemblages à haute densité. (Figure 159). Ils ressemblent aux dispositifs commerciaux, mais ils peuvent avoir des numéros de pièce les identifiant comme durcis.

**Aspect (à l'emballage):** Des assemblages électroniques et des composants sont typiquement expédiés dans des sachets en plastique marqués pour indiquer un dispositif sensible à l'électrostatique. Ils sont amortis dans l'enveloppe en caoutchouc de mousse ou de bulle pour la protection contre le choc et emballés dans des boîtes en carton.

18.A.2. «DéTECTEURS» spécialement conçus ou modifiés pour protéger les systèmes de fusées et les véhicules aériens sans pilote contre les effets nucléaires (par exemple, impulsion électromagnétique consécutive à une explosion atomique, rayons X, effets de souffle et effets thermiques combinés), et utilisables avec les systèmes visés à l'article 1.A.

**Notes techniques:**

*On entend par «détecteur» un dispositif mécanique, électrique, optique ou chimique qui détecte, identifie et enregistre ou relève automatiquement un stimulus tel qu'un changement de pression ou de température ambiante, un signal électrique ou électromagnétique ou un rayonnement provenant d'une matière radioactive. Sont également visés les dispositifs qui détectent un fonctionnement ou une défaillance en une fois.*

**Nature et But:** Comme on l'a vu plus haut, l'un des mécanismes de protection des circuits dans les environnements d'exploitation rudes et nucléaires intenses consiste à rendre les microcircuits intrinsèquement résistants à la dose totale de rayonnement ionisant. Une autre technique consiste à utiliser des détecteurs de rayonnement capables de détecter les débits de dose de rayonnement dans ces environnements et/ou de reconnaître et d'enregistrer les changements environnementaux résultant d'événements nucléaires. Ces détecteurs coupent ensuite l'alimentation du circuit ou déclenchent les dispositifs de protection qui répondent à ces conditions.

**Mode de fonctionnement:** Les détecteurs de rayonnement sont des dispositifs relativement simples qui détectent une augmentation du courant causé par le rayonnement. Si le niveau de rayonnement atteint et dépasse un seuil critique, les détecteurs envoient un signal de commande aux circuits de protection. Le mécanisme de protection éloigne les courants des appareils sensibles ou éteint l'appareil pour éviter le burn-out. Les détecteurs sont généralement dotés d'une entrée de test permettant d'activer le détecteur pendant les activités de construction ou d'entretien afin de vérifier son fonctionnement. Ils doivent généralement être capables de résister aux effets des rayonnements (par exemple, ils doivent être réutilisables) et avoir la capacité d'émettre des ordres de protection immédiatement avant que des dommages ne se produisent dans les microcircuits.

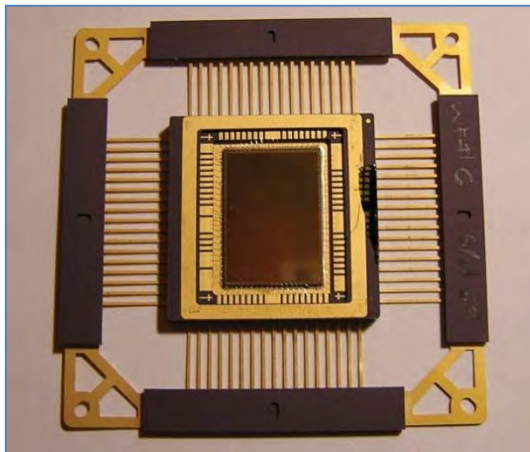


Schéma 160: Un détecteur durci contre le rayonnement. (l'Armée de l'air des États-Unis)

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Comme pour les microcircuits durcis, les détecteurs de rayonnement sont utilisés dans les lanceurs spatiaux et les missiles balistiques destinés à fonctionner dans les environnements spatiaux et sous-spatiaux à forte intensité nucléaire. Il n'est généralement pas nécessaire de protéger les véhicules aériens télépilotés (UAV) contre les rayonnements ionisants parce qu'ils sont habituellement plus vulnérables à la surpression due à l'explosion, qui aurait un impact sur un système UAV à plus grande distance d'une explosion nucléaire que le rayonnement.

**Autres usages:** Les détecteurs de rayonnement sont utilisés dans les mêmes applications de haute fiabilité et dans les environnements à forte intensité nucléaire tels que les microcircuits durcis. Il s'agit notamment de missions militaires, de télécommunications et scientifiques de longue durée. Ce

sont aussi des composants électroniques critiques sur les satellites météorologiques, les stations spatiales et les sondes planétaires. Les détecteurs sont également utilisés dans les applications de sûreté des réacteurs nucléaires, les systèmes d'instrumentation, de contrôle et de robotique.

**Aspect (sortie d'usine)** Les circuits des détecteurs de rayonnement peuvent consommer environ une douzaine de centimètres carrés d'espace sur les circuits imprimés. Alternativement, le détecteur peut être un microcircuit simple avec des composants de sélection externes, comme illustré à la Figure 160.

**Aspect (à l'emballage):** Des assemblages électroniques et des composants sont typiquement expédiés dans des sachets en plastique marqués pour indiquer un dispositif sensible à l'électrostatique. Ils sont amortis dans l'enveloppe en caoutchouc de mousse ou de bulle pour la protection contre le choc et emballés dans des boîtes en carton.

18.A.3. Radômes conçus pour résister à un choc thermique combiné supérieur à  $4,184 \times 10^6$  J/m<sup>2</sup> accompagnés d'un pic de surpression supérieur à 50 kPa, permettant de protéger les systèmes de fusées et les véhicules aériens sans pilote contre les effets nucléaires (par exemple, impulsion électromagnétique consécutive à une explosion atomique, rayons X, effets de souffle et effets thermiques combinés), et utilisables avec les systèmes visés à l'article 1.A.

- Fédération de Russie
- Royaume Uni
- États-Unis

Production globale



**Nature et but:** Les radômes sont des structures de coque non métalliques qui protègent les antennes de l'environnement tout en permettant la transmission de signaux radiofréquence avec une perte de signal et une distorsion minimales. Ils sont généralement faits d'un matériau isolant. De nombreuses installations au sol utilisent des radomes, et les nez des avions de ligne sont des radômes. Seuls les radômes spécialisés sont visés à l'article 18.A.3 du RCTM, c'est-à-dire ceux qui sont destinés à un environnement à effets nucléaires, parfois mais pas toujours conçus pour un vol à grande vitesse.

Les radômes contrôlés sont généralement faits de matériaux spéciaux comme la céramique ou le silicium phénolique. Les critères énoncés à l'article 18.A.3. limitent le contrôle aux radomes destinés à survivre dans un environnement de chaleur et de pression extrêmes.

**Mode de fonctionnement:** Les matériaux du radôme sont choisis en fonction de leur résistance et de la transparence du signal dans les bandes de fréquences d'intérêt sur l'ensemble de la plage de température prévue. Les radômes de vol sont généralement conçus pour améliorer les performances aérodynamiques du véhicule et pour éviter de perturber indûment le signal des effets prismatiques ou optiques. Les radômes correctement conçus permettent à l'antenne fermée d'émettre et de recevoir des signaux à travers le radôme avec un minimum de distorsions.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les environnements nucléaires envisagés au point 18 limitent l'utilisation de ces radômes à certains missiles de croisière et aux véhicules de rentrée (RV) transportés par des missiles balistiques à courte et moyenne portée. L'une des utilisations de ces radômes est de protéger les chercheurs de guidage installés dans le nez des RVs lorsqu'ils guident les RVs vers leurs cibles. Les missiles à plus longue portée reviennent dans l'atmosphère trop rapidement pour que les radômes montés sur le nez puissent survivre. Pour ces RVs, les radômes (fenêtres) peuvent être situés plus en arrière sur le corps du RVs. Les radômes contrôlés par le MTCR ne présentent généralement aucun intérêt pour les systèmes d'UAV autres que les missiles de croisière, car la plupart des drones ne peuvent survivre aux effets nucléaires spécifiés. Certaines installations au sol peuvent utiliser des radômes contrôlés s'il est souhaitable qu'ils soient durcis aux effets nucléaires spécifiés. Par exemple, les radômes autres que les radômes de vol répondant aux critères du point 18.A.3. pourraient être utilisés pour protéger les antennes des silos de missiles ou des postes de commandement conçus pour résister aux attaques nucléaires.





Schéma 161: un choix des radômes aérodynamiques (Northrop Grumman). Droite: radômes semblables à ceux qui pourraient être employés pour protéger des chercheurs de RV à la rentrée. (Industries américaines de technologie et de recherche)

**Autres usages:** Les radômes conçus pour la survie nucléaire ont peu (voire pas du tout) d'utilisations commerciales.

**Aspect (sortie d'usine):** Les radômes utilisés pour protéger les capteurs montés sur le nez des RV ou des missiles sont de forme conique ou ogive, comme le montre la Figure 161. Leur taille varie en fonction de la taille du RV ou du missile auquel ils sont attachés, et peut être aussi petite que 30 cm, et aussi grande que 2 m ou plus en diamètre et en longueur. Les matériaux sont fondamentalement des diélectriques dans des stratifiés solides ou de la mousse serrée formée comme un radôme moulé d'une seule pièce. Pour les petites antennes, on peut utiliser un radôme à paroi mince, diélectrique à structure spatiale (DSF), habituellement d'une épaisseur de 0,1 cm ou moins. L'épaisseur typique d'un radôme DSF à paroi laminée pleine est de 0,25 cm. Pour les radômes DSF à double couche de type sandwich, une couche de mousse est ajoutée à l'intérieur de la paroi mince du radôme. L'épaisseur de la mousse est choisie principalement pour l'isolation thermique et la résistance aux chocs thermiques de 100 cal par cm<sup>2</sup> (la même énergie par surface que  $4.184 \times 10^6$  J/m<sup>2</sup> dans le langage de commande). Un radôme composite de type sandwich, doté d'une paroi avec un corps en mousse est la conception la plus chère et fournit une force de résistance à des charges supérieures à 50 kPa de surpression maximale (environ 50% au-dessus de la pression atmosphérique). Un mur de mousse en sandwich a une épaisseur d'un quart de longueur d'onde pour le signal radiofréquence le plus élevé.

**Aspect (à l'emballage):** Les radômes sont expédiés dans des caisses en bois qui sont munies d'entretoises pour soutenir leur structure à paroi mince. Les radômes ont des armatures de fermeture montées sur leurs brides arrière pour maintenir la rigidité structurale en transit et sont enveloppés dans des sacs de polyéthylène. Les caisses peuvent utiliser soit des cloisons en bois formées pour le contreventement des contours, soit de la mousse de polyuréthane, pour supporter le radôme.

## 18.B. Équipement d'essai et de production

Aucune.

## 18.C. Matériaux

Aucune.

## 18.D. Logiciel

Aucune.

## 18.E. Technologie

18.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements mentionnés à l'article 18.A.

**Nature et But:** La "technologie" de protection contre les effets nucléaires désigne les connaissances ou les données nécessaires pour accroître la capacité de survie des systèmes électroniques dans les systèmes de missiles en milieu nucléaire lorsqu'ils sont en route vers une cible ou lorsqu'ils peuvent être exposés à ces environnements pendant leur stockage.

**Mode de fonctionnement:** La technologie de protection contre les effets nucléaires est disponible sous plusieurs formes. L'"assistance technique" peut consister en des instructions données par une personne ou des organisations expérimentées dans la mise au point de microcircuits ou de détecteurs d'événements nucléaires (rayons X, PEM, effets thermiques) résistants aux rayonnements qui conviennent aux missiles balistiques et qui fait office de formateurs sur un lieu de formation ou dans les locaux situés dans la classe ou dans un environnement à proximité des installations de fabrication. Un pays peut recevoir une assistance technique d'une ou de plusieurs entités étrangères qui possèdent les installations de conception et de développement nécessaires pour fournir une expérience pratique permettant d'accéder au développement ou à l'exploitation de la technologie souhaitée. Un pays peut également recevoir une aide à la passation de marchés sous la forme d'une aide à l'acquisition d'équipements, de machines et de matériels ou de conseils sur les articles à acquérir. Tous les manuels et matériels reçus pendant la formation peuvent être considérés comme des "données techniques".

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La "technologie" incluse dans cette section est utilisée pour protéger les composants électroniques d'un missile balistique contre les effets des rayonnements de la détonation nucléaire.

**Autres usages:** La "technologie" de protection contre les effets nucléaires est utilisée dans d'autres industries spécialisées dans les équipements à durcissement nucléaire. Les microcircuits trempés au sol se trouvent dans des environnements à fort rayonnement tels que la sécurité, l'instrumentation, le contrôle, les détecteurs et la robotique pour les réacteurs nucléaires et les accélérateurs de particules à haute énergie physique.

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

Catégorie II - Article 19:  
Autres systèmes de  
vecteurs complets

## Catégorie II - Article 19: Autres systèmes de vecteurs complets

## 19.A. Équipement, assemblages et composants

19.A.1. Systèmes complets de fusées (y compris les systèmes de missiles balistiques, les lanceurs spatiaux et les fusées-sondes), non spécifiés à l'article 1.A.1, ayant une « portée » d'au moins 300 kilomètres.

- |                        |              |
|------------------------|--------------|
| • Australie            | • Brésil     |
| • Bulgarie             | • Chine      |
| • République Tchèque   | • Égypte     |
| • France               | • Allemagne  |
| • Inde                 | • Iran       |
| • Israël               | • Italie     |
| • Japon                | • Libye      |
| • Corée du Nord        | • Pakistan   |
| • Nouvelle Zélande     | • Afrique du |
| • Fédération de Russie |              |
| • République de Corée  | • Espagne    |
| • Royaume Uni          | • États-Unis |

Production  
globale



**Nature et But:** Les systèmes complets de fusées visés à l'alinéa 19.A.1. sont semblables à la plupart des systèmes visés à l'alinéa 1.A.1., mais l'absence d'exigence d'une capacité de charge utile de 500 kg ou plus signifie que ces systèmes peuvent être de taille beaucoup plus petite que ceux visés au paragraphe 1.A.1.

L'évaluation des systèmes couverts par le présent point doit tenir compte de la capacité de décharger la charge utile et la portée. Cette capacité inhérente peut différer considérablement des spécifications des fabricants ou des concepts opérationnels prévus.

Ces systèmes sont contrôlés par le MTCR en raison de leur capacité à transporter des armes chimiques et biologiques, qui ne sont pas limitées à un poids minimal substantiel comme les armes nucléaires le sont par masse critique.

**Mode de fonctionnement:** Ces systèmes fonctionnent exactement de la même manière que les systèmes de fusées de

plus grande taille et se composent généralement des quatre éléments de base (une charge utile ou ogive, un sous-système de propulsion, un sous-système de guidage et de contrôle, et une structure globale). Les missiles balistiques de cette catégorie ont les mêmes caractéristiques de fonctionnement que les articles de plus grande taille visés au paragraphe 1.A.1. Les deux catégories peuvent avoir un ou plusieurs étages, et ils peuvent utiliser des propergols solides ou liquides, ou un hybride des deux. Par rapport à leurs homologues de plus grande taille de l'article 1.A.1., les missiles contrôlés par l'article 19.A.1. sont plus susceptibles d'être lancés à partir d'aéronefs. Cette dernière méthode de lancement se fait à haute altitude pour réduire la traînée atmosphérique, qui devient plus importante à mesure que les missiles et les SLV deviennent plus petits.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les missiles balistiques sont utilisés pour lancer une charge utile d'armes vers une cible définie. Les charges utiles potentielles de faible masse comprennent les armes chimiques et biologiques. De nombreux missiles existants n'ont pas une portée de 300 km pour des charges utiles supérieures à 500 kg (et ne sont donc pas visés par l'article 1.A.1), mais très souvent, les missiles de cette catégorie peuvent servir de nouveau à transporter de petites charges utiles (<500 kg) sur des distances supérieures à 300 km. Cela montre l'importance de tenir compte de la capacité de se débarrasser de la charge utile et de la portée lors de l'évaluation des systèmes couverts par cet article.

Des lanceurs spatiaux et les fusées-sondes sont utilisés pour placer des satellites en orbite ou pour recueillir des données dans la haute atmosphère. À partir des années 1950, des fusées sondes ont été utilisées pour recueillir des données scientifiques dans la haute atmosphère. Au XXI<sup>e</sup> siècle, on a constaté un regain d'intérêt pour l'envoi de petites charges utiles scientifiques sur des trajectoires suborbitales, afin d'obtenir plusieurs minutes de chute libre (exposition à la microgravité). De même, les petits lanceurs spatiaux (SLV) ont suscité un regain d'intérêt pour la mise en orbite de petits satellites. Dès 2017 environ, de nombreuses entreprises commerciales privées du monde entier ont cherché à développer de tels SLV plus petits, en espérant qu'il y aura des clients pour des lancements dédiés à de petites charges utiles telles que les cubesats (<10 kg), par exemple.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Les systèmes complets de fusées de cette catégorie sont très similaires en apparence à ceux de la catégorie 1.A.1, mais à plus petite échelle. Il s'agit de grands cylindres longs et étroits qui, une fois assemblés, ont généralement des dimensions d'environ 5 m de long, 0,5 m de diamètre et un poids de 1 500 kg avec une pleine charge de propergol. La Figure 162 donne un exemple représentatif d'une fusée sonde couverte par l'article 19.A.1. Les missiles visés par ce critère de contrôle peuvent comporter plusieurs étages ou n'en comporter qu'un seul. Ils sont relativement lourds lorsque des propergols solides sont utilisés, ou légers lorsqu'ils ne contiennent pas de combustible s'ils sont conçus pour des propergols liquides.



**Schéma 162:** Une grande fusée-sonde de catégorie II, capable de livrer une charge utile de 250 kilogrammes à une portée de 400 kilomètres. Le moteur à propergol solide de la fusée, avec le manteau de bec en acier, est entouré de quatre ailerons de queue en nid d'abeilles avec des bords d'attaque en alliage de titane. (JAXA)

**Aspect (à l'emballage):** Les principaux composants des systèmes de fusées sont souvent expédiés dans des caisses ou des conteneurs métalliques scellés vers une installation d'assemblage près du lieu de lancement, où ils sont assemblés et testés pour vérifier leur disponibilité opérationnelle. Toutefois, les petits lanceurs sont plus susceptibles que les gros d'être expédiés entièrement assemblés. Un exemple spécifique est celui des missiles balistiques mobiles, qui peuvent être entièrement assemblés et stockés en position horizontale dans un téléporteur-élévateur-lanceur mobile (TEL) et déplacés vers le point de lancement si nécessaire. Les petits missiles et les SLV peuvent être transportés par avion et/ou lancés à partir d'un avion.



19.A.2. Systèmes complets de véhicules aériens sans pilote (y compris les systèmes de missiles de croisière, les engins cibles et les engins de reconnaissance), non spécifiés à l'article 1.A.2, ayant une « portée » d'au moins 300 kilomètres

**Nature et But:** Les systèmes d'UAV visés au point 19.A.2. sont de nature beaucoup plus diverse que ceux visés au point 1.A.2. en raison de l'absence d'une capacité de charge utile de 500 kg requise. Cette catégorie d'UAV comprend donc un certain nombre de petits UAV d'endurance longue portée et d'UAV d'endurance longue distance à moyenne altitude (MALE) dont les masses maximales au décollage (comprises entre moins de 50 kg et 1 500 kg) sont bien inférieures à celles des grands systèmes d'endurance longue altitude (HALE) qui répondent aux critères énoncés au point 1.A.2.

L'évaluation des systèmes couverts par le présent point doit tenir compte de la capacité de décharger la charge utile et la portée. Cette capacité inhérente peut différer considérablement des spécifications des fabricants ou des concepts opérationnels prévus. Ces systèmes sont contrôlés par le MTCR en raison de leur capacité à transporter des armes chimiques et biologiques, qui ne sont pas limitées à un poids minimal substantiel comme les armes nucléaires le sont par masse critique.

Comme pour les systèmes d'UAV de catégorie I du MTCR de plus grande taille, les UAV visés au paragraphe 19.A.2. sont des véhicules aérobies équipés de petites turbines ou de moteurs à piston qui entraînent soit des hélices libres soit des hélices à canal. Les UAV à longue portée, les UAV d'endurance et les UAV MALE ont des altitudes de fonctionnement typiques comprises entre 5 000 m et 8 000 m et une endurance maximale comprise entre 12 h et 48 hrs.

Les missiles de croisière se distinguent de la plupart des autres UAV par leur utilisation comme plates-formes de lancement d'armes et par des trajectoires de vol qui réduisent souvent leur vulnérabilité aux défenses. De plus, les missiles de croisière n'ont pas de moyens de récupération conçus (p. ex. train d'atterrissage, parachutes, etc.). Les missiles de croisière peuvent voler à presque n'importe quelle vitesse, mais ils sont habituellement propulsés par de petits réacteurs qui fonctionnent le plus souvent à des vitesses subsoniques élevées (moins de 900 km/heure). Un missile de croisière antinavire de catégorie II est illustré à la Figure 163.

**Mode de fonctionnement:** Les systèmes d'UAV peuvent être contrôlés en vol par un système de navigation embarqué, qui peut suivre une route préprogrammée en suivant des points de cheminement. Il est également possible de régler le cap du système d'UAV en vol à l'aide des commandes d'un système au sol, relayées par la liaison de données embarquée. Les stations au sol des UAV comprennent un système de commandes de vol (habituellement une console à manette) et une série de moniteurs d'affichage et d'équipement d'enregistrement. Pendant ce temps, un système de commandes de vol embarqué maintient le système d'UAV en vol contrôlé, ajustant les gouvernes pour maintenir la trajectoire de vol souhaitée.



Schéma 163: Un missile de croisière anti-navire de catégorie II. (Équipement de MTCR, logiciel et manuel de technologie, troisième édition (mai 2005))

Les missiles de croisière de cette catégorie fonctionnent exactement comme ceux décrits au point 1.A.2: la plupart contiennent un système de capteurs qui les guide vers leurs cibles en utilisant les caractéristiques du terrain ou les signatures des cibles. Les missiles de croisière utilisent de plus en plus des systèmes de navigation inertielle, mis à jour par les récepteurs du système mondial de navigation par satellite (GNSS), en plus ou à la place des systèmes de navigation assistés par le sol pour les guider jusqu'à proximité de la cible. Ces missiles peuvent être lancés depuis des TEL (Transporter-Erector-Launchers), mais aussi depuis des navires, des sous-marins ou des avions.

Comme pour les autres UAV décrits au point 1.A.2, les systèmes visés au point 19.A.2 sont habituellement équipés de plusieurs types de charges utiles, y compris l'équipement de capteurs, contiennent une électronique de bord, des liaisons de données et sont soutenus par une composante au sol. Au cours des opérations, la collecte du véhicule aérien sans pilote (avec ses charges utiles et son aéro-électronique) et de sa composante de soutien au sol est souvent appelée un système aérien sans pilote (SAU). L'une des principales différences entre ces UAV de catégorie II et les UAV de catégorie I plus gros est que leur gamme plus large de tailles et de poids plus légers permet une panoplie d'options de lancement également plus large. De nombreux UAV MALE sont lancés et récupérés par décollage et atterrissage conventionnels sur roues, tandis qu'un certain nombre d'UAV plus petits peuvent être lancés à l'aide de catapultes pneumatiques ou élastiques (Figure 164), et de boosters. Plusieurs de ces petits systèmes peuvent aussi être portatifs.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les UAV décrits dans le présent article sont capables de transporter une charge utile de moins de 500 kg à une portée égale ou supérieure à 300 km.

**Autres usages:** Les charges utiles peuvent comprendre des systèmes multimitraillages, notamment du matériel de renseignement, de surveillance et de reconnaissance (ISR) et des armes classiques. Les petits UAV sont plus susceptibles d'être utilisés exclusivement pour des missions ISR et la recherche scientifique.

**Aspect (sortie d'usine)** Les systèmes complets d'UAV contrôlés sous cette rubrique se distinguent par une grande variété de formes et de caractéristiques. Il est plus courant que l'avion ait une propulsion à voilure fixe et aérobie. Les nouvelles versions d'aéronefs sans pilote à voilure tournante sont conçues pour atteindre des portées supérieures à 300 km.

Les systèmes d'UAV spécialement conçus présentent généralement une forme conique, parfois avec une zone bulbeuse près de l'extrémité avant ou du nez du fuselage. Les systèmes complets d'UAV contrôlés au titre de ce point peuvent également comprendre des aéronefs pilotés qui sont modifiés pour voler de façon autonome, à distance ou comme véhicules pilotés en option. De tels systèmes conservent aussi habituellement un poste de pilotage qui est vide ou rempli d'équipement électronique ou de charge utile pendant le vol. Les UAV de plus grande taille visés à l'alinéa 19.A.2 ont plusieurs caractéristiques en commun avec ceux visés à l'alinéa 1.A.2, notamment les ailes à grandes portées montées au milieu du fuselage, les fuselages cylindriques à renflements ou dômes prononcés au-dessus du nez, les moteurs arrière montés, la queue en V ou en V inversé et le train entièrement escamotable. Les missiles de croisière de cette catégorie sont très similaires en apparence à ceux de la catégorie 1.A.2.

**Aspect (à l'emballage):** Les UAV de la catégorie II, y compris les missiles de croisière, sont fabriqués en composants ou en sections à différents endroits et par différents fabricants, et assemblés sur un site militaire ou dans une installation de production civile. Les systèmes d'UAV décrits au présent article peuvent être emballés comme des unités complètes, ou ils peuvent être séparés aux points de rupture et emballés selon les mêmes procédures et matériaux que les UAV décrits en 1.A.2.



Schéma 164: Un UAV à résistance de moyenne portée. En dépit de sa petite taille, cet UAV élastique lancé par catapulte est capable de porter une charge utile d'1 kilogramme (caméras IR et numérique) à une portée de 400 kilomètres (Aerovision Vehiculos Aereos, SL)

19.A.3. Systèmes complets de véhicules aériens sans pilote, autres que ceux visés aux articles 1.A.2. ou 19.A.2, ayant toutes les caractéristiques suivantes:

a. Ayant l'une des caractéristiques suivantes:

1. Ayant une autonomie de contrôle et de navigation; ou
2. Pouvant effectuer un vol commandé en dehors du champ de vision direct d'un opérateur humain; et

b. Ayant l'une des caractéristiques suivantes:

1. Comportant un système/mécanisme de pulvérisation d'aérosol d'une capacité supérieure à 20 litres; ou
2. Conçus ou modifiés pour comporter un système/mécanisme de pulvérisation d'aérosol d'une capacité supérieure à 20 litres.

**Note:**

*L'article 19.A.3. ne vise pas les modèles réduits d'aéronef, en particulier ceux spécialement conçus à des fins récréatives ou de compétition.*

**Notes techniques:**

1. *Un aérosol est constitué de particules ou de liquides n'entrant pas dans la composition du carburant, de sous produits ou d'additifs et fait partie de la charge utile à disperser dans l'atmosphère. Les pesticides liquides épandus sur les cultures et les poudres chimiques utilisées pour ensemercer les nuages sont des exemples d'aérosol*

2. *Un système/mécanisme de pulvérisation d'aérosol contient tous les dispositifs (mécaniques, électriques, hydrauliques, etc.) nécessaires au stockage et à la dispersion de l'aérosol dans l'atmosphère.. Il permet notamment d'injecter l'aérosol dans les vapeurs rejetées lors de la combustion et dans le sillage des hélices.*

**Nature et But:** Le point 19.A.3. couvre les UAV équipés ou conçus pour transporter un système/mécanisme de distribution d'aérosol d'une capacité supérieure à 20 litres et une capacité autonome de commande de vol et de navigation ou la capacité de maintenir un vol contrôlé au-delà de la ligne de visée de l'opérateur humain.

**Mode de fonctionnement:** Le système d'UAV peut être basé sur un avion spécialement conçu pour le vol sans pilote. Le système d'UAV peut également être une modification d'un avion à voilure fixe ou d'un hélicoptère piloté. Selon le moyen de décollage, l'avion peut être caché et lancé à partir d'une variété d'endroits, y compris des pistes d'atterrissage accidentées, des navires maritimes ou des aéroports standard. Le système d'UAV peut être contrôlé par un système de navigation embarqué, qui peut suivre une route préprogrammée en suivant des jalons de cheminement. Il est également

possible d'ajuster le cap du système d'UAV en vol à l'aide des commandes d'un système au sol, ou de le relayer par une liaison de données embarquée à partir d'une autre plate-forme.



**Schéma 165:** Un système de jet aérien modulaire, utilisé pour l'application de pesticide, peut employer un arrangement appelé volume très réduit et des tuyères de perche de jet spécialisés comme ceux montrés ici pour diffuser une demi-once à une once de produit chimique sur une surface d'un acre. (l'Armée de l'air des États-Unis)

- Australie
- Bulgarie
- République Tchèque
- France
- Inde
- Irak
- Italie
- Lybie
- Pakistan
- Afrique du sud
- Suède
- Ukraine
- Royaume Uni
- Brésil
- Chine
- Égypte
- Allemagne
- Iran
- Israël
- Japon
- Corée du Nord
- Fédération de Russie
- République de Corée
- Syrie
- UAE
- États Unis

## Production globale



Pendant ce temps, un système de commandes de vol embarqué maintient le système d'UAV en vol contrôlé, ajustant les gouvernes pour maintenir la trajectoire de vol souhaitée du système.

Les agents de guerre biologique (BW) peuvent être militarisés par transformation en aérosols. Un aérosol est défini sous cette rubrique comme se composant de particules ou de liquides autres que des composants de carburant, des sous-produits ou des additifs qui font partie de la charge utile du système d'UAV à disperser dans l'atmosphère. Ces aérosols peuvent comprendre des pesticides utilisés pour protéger les cultures des insectes et des produits chimiques secs pulvérisés dans l'atmosphère pour semer la formation des nuages. Au minimum, un système de pulvérisation contient un réservoir pour stocker les aérosols, une pompe pour acheminer les aérosols vers la tuyère de pulvérisation et la tuyère elle-même pour émettre le nuage aérosol. (Figure 165)

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La dispersion d'armes biologiques ou d'agents chimiques à l'aide d'un nuage aérosolisé est le moyen de dissémination le plus efficace.

Les trajectoires de vol des drones, y compris celles des missiles de croisière, conviennent à la distribution d'agents biologiques et chimiques, car le missile peut être préprogrammé pour survoler une cible sélectionnée et distribuer les agents depuis la soute de la tête militaire pendant un certain temps à basse altitude.

**Autres usages:** Un UAV décrit dans cet article a pu être utilisé dans des industries agricole et de lutte contre les parasites.

**Aspect (sortie d'usine)** Les UAV incorporant des générateurs d'aérosols ou modifiés pour pouvoir transporter de tels systèmes/mécanismes peuvent prendre diverses formes. La portée et la capacité de charge utile varient, et elles peuvent être à voilure fixe ou à voilure tournante. Les systèmes complets de drones contrôlés au titre de cet article peuvent également comprendre des aéronefs pilotés qui sont modifiés pour voler de façon autonome ou à distance. De tels aéronefs modifiés conservent aussi habituellement un poste de pilotage qui est vide ou rempli d'équipement électronique ou de charge utile pendant le vol.

La majorité des systèmes connus de pulvérisation aérienne autonome sont basés sur des hélicoptères. Ces UAV à décollage et atterrissage verticaux (VTOL) sont généralement conçus à des fins agricoles, pulvérisant des pesticides ou des engrais sur les cultures. Les systèmes de cette catégorie se caractérisent souvent par un ou plusieurs réservoirs de charge utile montés à l'extérieur, soit sur le ventre ou sur les côtés de l'aéronef, et par des barres de pulvérisation et/ou une tuyère conique. Ces appareils peuvent également être équipés de charges utiles d'observation, y compris des caméras TV et IR et d'autres capteurs. Les UAV à voilure tournante conçus pour l'épandage agricole, comme ceux illustrés à la Figure 166, ont tendance à avoir un rayon de mission, une portée et une endurance réduits en raison des limites de commandement et de contrôle et de la mission prévue de ce dernier, qui stipule la pulvérisation à proximité.



En général, ils ne peuvent pas fonctionner pendant plus de quelques heures et à des distances supérieures à quelques kilomètres, mais des versions à plus longue portée sont possibles dans cette catégorie.

Les UAV aérosols sur les plates-formes à voilure fixe pourraient être conçus soit comme des UAV équipés de réservoirs et de dispositifs de dispersion, soit comme des avions conçus pour la pulvérisation pilotée et équipés de systèmes de contrôle autonomes. Il peut s'agir de réservoirs internes ou externes et de systèmes de pulvérisation montés sur le ventre, le nez, la queue ou les ailes de l'embarcation.

**Aspect (à l'emballage):** Les systèmes UAV visés par le présent article peuvent être emballés en vue de leur expédition comme décrit à l'article 1.A.2. Ces UAV sont souvent emballés sous forme de plusieurs composants et sous-systèmes distincts, et assemblés ensemble au besoin pour fonctionner. Les sous-systèmes pourraient comprendre l'aéro-électronique, des liaisons de données, une station au sol et un système de lancement et de récupération. Les composants peuvent comprendre des éléments du fuselage, des ailes,

des gouvernes et du train d'atterrissage. Certains systèmes UAV intègrent également des patins d'atterrissage, les catapultes servant de mécanisme de lancement. Le réservoir et l'appareil de pulvérisation peuvent être emballés dans des caisses en bois et expédiés séparément.



Schéma 166: Un UAV à voilure tournante conçu avec des réservoirs de produits chimiques et des rampes de pulvérisation pour l'agriculture. (Yamaha)



## 19.B. Équipement d'essai et de production

### 19.B.1. «Équipements de production» spécialement conçus pour les systèmes mentionnés

**Nature et But:** Les installations de production spécialement conçues pour la construction de systèmes de distribution complets se présentent sous différentes formes. Certaines sont intégrées dans un complexe industriel plus vaste qui comprend des capacités de conception et d'essai, tandis que d'autres sont autonomes et éloignées des zones habitées. Les deux contiennent tous les dispositifs nécessaires pour produire des systèmes de fusée ou d'UAV. Les installations destinées aux missiles balistiques et aux lanceurs spatiaux nécessitent au moins un bâtiment suffisamment grand pour assembler l'ensemble du système et contenir les dispositifs d'alignement et le matériel de manutention nécessaires pour accomplir la mission. Les installations d'UAV peuvent être considérablement plus petites et ressembler à des entrepôts ou à des sites industriels ordinaires.

**Mode de fonctionnement:** Les matériaux, composants et sous-ensembles sont livrés à l'unité de production dans des boîtes, des caisses et, pour les articles plus grands, sur des palettes, des camions ou des wagons. Dans le cas des systèmes de fusée, cela comprend les réservoirs de carburant et d'oxydant ou les boîtiers de moteur, les ensembles moteur, les revêtements et la charge utile. Pour les systèmes d'UAV, cela comprend la cellule d'avion, les longerons d'aile et les ensembles moteurs. Les équipements de manutention tels que les chariots élévateurs à fourche et les ponts roulants sont utilisés pour déplacer les articles jusqu'à leur position appropriée dans l'installation de production. Des gabarits, des montages, de l'équipement d'alignement et de l'outillage sont ensuite utilisés pour construire le système de missile ou d'UAV. Pour les gros missiles ou les lanceurs spatiaux, des lasers d'alignement sont utilisés pour faciliter le processus.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Des installations de production sont employées pour assembler un système de missiles complet à partir de ses montages partiels et éléments. À la fin de chaque étape de production, des essais mécaniques et électriques d'ajustement et de fonctionnement sont réalisés pour vérifier que l'assemblage est prêt pour la prochaine étape. Une fois qu'une fusée est assemblée et qu'elle a passé avec succès tous les essais de production, elle peut être démontée aux points de rupture de corps prescrits. Ces composants de missiles séparés sont chargés dans des conteneurs ou des caisses individuels en vue de leur expédition vers une installation de stockage à long terme ou vers le point de lancement opérationnel pour le remontage final et l'utilisation. Toutefois, les UAV, y compris les missiles de croisière, sont généralement expédiés entièrement assemblés à des unités opérationnelles (selon le type de plate-forme de lancement) ou à des dépôts de stockage pour un stockage à long terme.

**Autres usages:** Les gabarits, montages et outillages sont généralement conçus pour un seul système de fusée ou d'UAV. Il n'est ni pratique ni économique de modifier ces unités pour d'autres usages.

**Aspect (sortie d'usine)** Les gabarits et les fixations sont généralement assemblés par soudage ou boulonnage de grandes plaques d'acier et de poutres en I ou d'éléments tubulaires ensemble sur le plancher du bâtiment de production. Dans certains cas, ces dispositifs sont construits sur des patins flottants, non boulonnés au sol; ces patins isolent la structure des vibrations, qui pourraient autrement causer un mauvais alignement de leurs points de référence de précision.

**Aspect (à l'emballage):** Pour certains systèmes, les gabarits et les dispositifs d'assemblage sont souvent trop grands et trop lourds pour être emballés et expédiés à l'usine de production sous forme d'unités complètes. Ils sont expédiés séparément dans de grandes caisses ou protégés sur des palettes pour être assemblés sur place. Ils seront solidement fixés à la caisse pour limiter les mouvements et prévenir les dommages. Les gabarits plus petits peuvent être emballés individuellement sur des caisses ou sur palettes pour l'expédition. Les grandes usines peuvent produire des gabarits et des dispositifs d'assemblage sur place dans le cadre de leur effort de fabrication global.

## 19.C. Matériaux

Aucune.

## 19.D. Logiciel

19.D.1. «Logiciel» assurant la coordination de la fonction de plus d'un sous-système, spécialement conçu ou modifié pour «utilisation» dans les systèmes visés aux articles 19.A.1. ou 19.A.2.

*Note:*

*Dans le cas d'un appareil habité converti pour fonctionner comme véhicule aérien sans pilote mentionné à l'article 19.A.2,*

*l'article 19.D.1. comprend le «logiciel», comme suit:*

*a. «logiciel» spécialement conçu ou modifié pour intégrer l'équipement de conversion aux fonctions du système de l'appareil;*

*b. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié pour faire fonctionner l'appareil en tant que véhicule aérien sans pilote.*

**Nature et But:** Le logiciel décrit dans cet article a la même nature et le même but que celui décrit à l'article 1.D.2.

**Mode de fonctionnement:** Le logiciel décrit dans cet article a la même méthode de fonctionnement que celle décrit à l'article 1.D.2.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le logiciel décrit dans cet article a les mêmes utilisations relatives au missile que le logiciel décrit dans l'article 1.D.2.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Le logiciel décrit dans cet article a le même aspect que celui décrit à l'article 1.D.2.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les clés USB et les documents contenant le logiciel qui commande plus d'un sous-système et qui est spécialement conçu ou modifié pour usage dans les systèmes spécifiés en 19.A. sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis sur un réseau informatique ou Internet.

**Informations complémentaires:** Généralement, il n'y a pas de logiciel de vol dans les petits systèmes de fusée qui sont des systèmes de "point and shoot" non guidés, stabilisés par rotation. Un code de simulation de trajectoire bidimensionnelle/à trois degrés de liberté peut être chargé dans la console de lancement ou être utilisé pour préparer les tables de mise à feu.

## 19.E. Technologie

19.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements mentionnés aux articles 19.A.1 et 19.A.2

**Nature et But:** La technologie décrite dans cet article a la même nature et le même but que celle décrite à l'article 1.E.1.

**Mode de fonctionnement:** La technologie décrite dans cet article présente la même méthode de fonctionnement que celle décrite à l'article 1.E.1.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** La technologie décrite dans cet article a les mêmes utilisations relatives au missile que celle décrite dans l'article 1.E.1.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A

## ARTICLE 20 - Autres sous-systèmes complets

## Catégorie II - Article 20: Autres sous-systèmes complets

## 20.A. Équipement, assemblages et composants

20.A.1. Sous-systèmes complets comme suit:

- a. Étages de fusée individuels, autres que ceux visés à l'article 19.A, utilisables dans les systèmes visés à l'article 19.A;
- b. Sous-systèmes de propulseur à fusée, non spécifiés à l'article 2.A.1., utilisables avec les systèmes mentionnés à l'article 19.A.1, comme ci-dessous:
  1. Moteurs-fusées à propergol solide ou hybrides, d'une impulsion totale égale ou supérieure à  $8.41 \times 10^5 \text{Ns}$  mais inférieure à  $1.1 \times 10^6 \text{Ns}$
  2. Moteurs fusée à propergol liquide ou à propergol gélifié intégrés ou conçus ou modifiés pour être intégrés dans un système de propulsion à propergol liquide ou à propergol gélifié ayant une capacité d'impulsion totale égale ou supérieure à  $8.41 \times 10^5 \text{Ns}$  mais inférieure à  $1.1 \times 10^6 \text{Ns}$

- Brésil
- Égypte
- Allemagne
- Iran
- Italie
- Corée du Nord
- République de Corée
- Royaume Uni
- États-Unis
- Chine
- France
- Inde
- Israël
- Japon
- Pakistan
- Ukraine

Production  
globale



**Nature et But:** Les sous-systèmes complets (y compris les étages de fusée à propergol solide, liquide, hybride ou en gel, les moteurs de fusée à propergol solide, hybride ou en gel et les moteurs de fusée à propergol liquide) utilisés dans les systèmes relevant du point 19.A.1 sont similaires à la plupart des points visés au point 2.A.1. La principale différence est déterminée par l'absence d'exigence d'avoir une capacité de charge utile de 500 kg ou plus dans les systèmes visés à l'article 19.A. La taille réduite de ces systèmes impose que leurs composants et systèmes de propulsion soient également plus petits et moins puissants que ceux visés au point 2.A.1.

Les moteurs-fusées à propergol solide, hybride et à propergol gélifié qui répondent aux exigences de l'article 20.A.1., mais non au point 2.A.1 sont relativement inhabituels, car les seuils d'impulsion totaux pour ce critère de contrôle sont peu différents. Le seuil de l'article 20.A.1.b.1. dépasse les trois quarts du montant de l'article 2.A.1.c.1.

Les moteurs fusées à propergol liquide ont été construits dans une très large gamme de tailles (grandeurs de poussée). Ils vont des gros moteurs de lancement spatial aux petits moteurs de contrôle de réaction conçus pour ajuster la trajectoire d'un véhicule spatial en dehors de l'atmosphère. Bien que ces petits moteurs de contrôle de réaction fonctionnent à faible poussée, ils sont généralement capables de brûler pendant de longues durées (milliers de secondes) et, par conséquent, ils peuvent eux aussi remplir le critère de contrôle total des impulsions spécifié au point 20.A.1.1.b.2. Dans la pratique, la capacité d'impulsion totale de tout moteur fusée à propergol

liquide est déterminée par le volume des réservoirs de propergol reliés au moteur.

Les petits étages de fusées, ainsi que leurs moteurs à propergol solide ou à propergol liquide, ont fait l'objet d'une attention accrue au XXI<sup>e</sup> siècle en vue de déployer les plus petits satellites sur l'orbite de la Terre.

Les moteurs à propergol solide sont parfois utilisés pour les manœuvres des engins spatiaux au-delà de l'orbite terrestre basse. Les moteurs à propergol solide sont parfois utilisés pour les manœuvres des engins spatiaux au-delà de l'orbite terrestre basse.

**Mode de fonctionnement:** Les étages de fusée se composent généralement d'une structure, d'une propulsion à propergol solide ou liquide et d'un système de commande. Comme leurs équivalents plus grands, les systèmes de fusée à plusieurs étages rejettent les étages inférieurs lorsqu'ils brûlent leur propergol. Pour plus de détails sur les méthodes d'exploitation, voir les explications correspondantes dans le Manuel du MTCR pour les points 2.A.1.a. et 2.A.1.c. du présent document.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les étages de fusée commandés par 20.A.1 sont les composants nécessaires et essentiels des systèmes de fusée auxquels ils appartiennent. Ils sont également utilisés pour les essais et le développement des missiles. Les moteurs-fusées à propergol solide, hybride et gélifié fournissent la poussée pour accélérer le système jusqu'à la vitesse exigée.

**Autres usages:** Dans les installations d'essai, les moteurs-fusée relativement petits à propergol solide ont été utilisés pour atteindre des accélérations et des vitesses élevées, en particulier pour pousser des traîneaux de fusées qui accélèrent un objet à tester sur une piste au sol. Les petits moteurs à propergol liquide sont largement utilisés sur les satellites et les engins spatiaux.

**Aspect (sortie d'usine):** Les étages de fusée, les moteurs à propergol solide, hybride et à gel et les moteurs à propergol liquide visés à l'article 20.A.1. ressemblent à des versions plus petites de leurs homologues plus grands visés à l'article 2.A.1. Les étages de fusée individuels visés à l'article 20.A.1. ont généralement la forme de cylindres de 1,5 m à 3 m de longueur et de 0,3 m à 1 m de diamètre. Les étages et moteurs de fusées à propergol solide sont généralement des cylindres fabriqués à partir de tôle d'acier robuste, de matériaux composites (fibres dans des résines) ou d'une combinaison des deux. Les étages de fusée à propergol liquide sont des cylindres constitués principalement de parois de réservoirs de propergol, ces derniers étant généralement en aluminium.

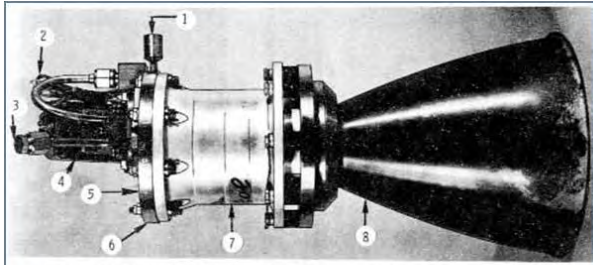
Les moteurs fusée à propergol solide sont des tubes cylindriques avec des dômes aux deux extrémités pour la fixation de l'allumeur et de la tuyère, respectivement (Figure 167). Les tuyères sont généralement fixées avant l'expédition. La taille et les dimensions de ces moteurs dépendent de leur utilisation.

Les moteurs fusée à propergol solide illustrés à la Figure 168 présentent un diamètre de 0,7 m et une longueur de 1,2 m. Leur boîtier presque sphérique les rend aptes aux manœuvres au-delà de la majeure partie de l'atmosphère, y compris les étages supérieurs des missiles et les manœuvres des engins spatiaux.

Les moteurs de fusée à propergol liquide pour les missiles relativement petits sont moins susceptibles que leurs homologues plus gros d'inclure des pompes centrifuges rotatives entraînées par turbine (turbopompes). La Figure 167 montre un exemple d'un tel moteur alimenté sous pression, conçu pour recevoir des propergols provenant de réservoirs pressurisés à des niveaux plus élevés que la chambre de combustion du moteur.

**Aspect (à l'emballage):** Les étages de fusées sont expédiés dans des conteneurs ou des caisses en acier ou en bois spécialement conçus à cet effet. Les moteurs fusées à propergol solide sont généralement expédiés dans des conteneurs en acier ou en aluminium ou dans des caisses en bois. Les moteurs de fusées à propergol liquide sont également expédiés dans des conteneurs ou des caisses spécialement conçus à cet effet.





- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| 1- Chambre orifice d'instrumentation de pression | 5- Port d'entrée carburant            |
| 2- Câbles en plomb électriques                   | 6- Carter injecteur                   |
| 3- Port d'entrée oxydant                         | 7- Assemblage chambre de poussée      |
| 4- Valve bi-propulseur                           | 8- Prolongement tuyère de rayonnement |

Schéma 167: *Gauche*: Un moteur de commande de réaction; *Gauche inférieure*: une pile de moteurs-fusées à propergol solide commandés sous la catégorie II. Les moteurs du côté gauche de cette photo sont assez grands pour être commandés au point 2, catégorie I. *Ci-dessous*: Une vue de côté d'un récipient d'expédition contenant quatre moteurs-fusées à propergol solide de catégorie II. (Équipement de MTCR, logiciel et manuel annexe de technologie, troisième édition (mai 2005))

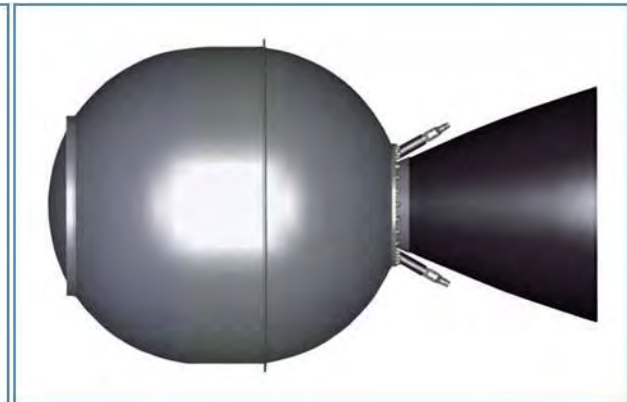
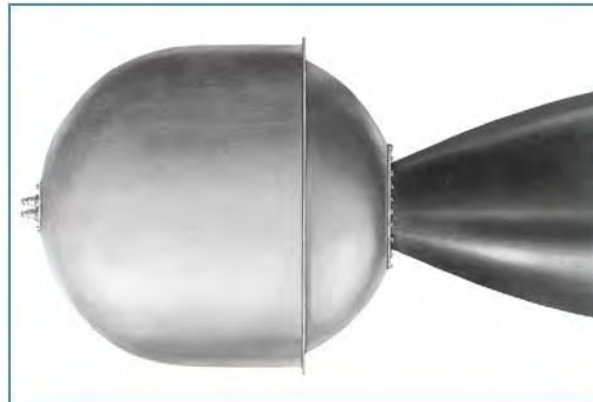


Schéma 168: Sur le côté gauche se trouve un moteur-fusée de catégorie II qui a été utilisé comme moteur d'apogée dans une gamme d'applications depuis 1975. Sur la droite, une version du même moteur développé en 2006. (ATK)

## 20.B. Équipement d'essai et de production

### 20.B.1. «Équipements d'assistance à la production» spécialement conçus pour les sous-systèmes mentionnés par l'article 20.A

**Nature et But:** Les installations de production de sous-systèmes sont souvent de vastes zones industrielles conçues pour fabriquer des moteurs fusées à propergol solide ou liquide. Les installations de mélange de propergol solide sont souvent construites dans des régions isolées, éloignées des zones habitées pour des raisons de sécurité et de sûreté.

**Mode de fonctionnement:** Les sous-ensembles sont fabriqués et souvent testés dans leurs installations de production avant d'être expédiés soit vers un entrepôt, soit vers une zone d'assemblage final. Les matières brutes telles que la tôle d'acier sont laminées dans les formes appropriées et soudées ensemble pour former des cylindres qui deviendront le boîtier du moteur-fusée à propergol solide. Des dômes d'extrémité sont soudés sur ces cylindres pour compléter l'enveloppe. Chaque dôme d'extrémité possède une ouverture circulaire renforcée pour monter la bougie d'allumage de l'étage et pour attacher la tuyère.

Les moteurs fusée à propergol liquide ou à gel sont des dispositifs mécaniques complexes qui nécessitent de nombreuses étapes précises d'usinage et d'assemblage, souvent en salle blanche. Les petites pièces de précision sont coulées, usinées, assemblées et nettoyées.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les composants et assemblages fabriqués dans ces installations servent à fabriquer et à tester les articles énumérés à l'article 20.A.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Article 20.B.1. Les installations et équipements de production des étages complets et des moteurs fusées à propergol solide, hybride et à gel et des moteurs fusées à propergol liquide sont similaires à ceux décrits au point 2.B.1. Les installations et le matériel décrits dans la présente rubrique peuvent ne pas être distingués de ceux qui sont conçus pour produire des étages de fusée ou des moteurs de fusée à propergol liquide de plus grande capacité. Cependant, ils peuvent être de plus petite taille. Les installations et l'équipement de production des étages de fusée et des moteurs visés à l'article 20.A.1. sont semblables à ceux dont il est question à l'article 2.A.1. et, dans la plupart des cas, ils ne se distingueront pas de ceux des articles plus gros.

**Aspect (à l'emballage):** Les installations et l'équipement décrits dans la présente rubrique peuvent être emballés selon les mêmes procédures et matériaux que ceux décrits à la rubrique 2.B.1 pour les étages complets et les moteurs fusée à propergol solide, hybride ou à gel et les moteurs fusée à propergol liquide.

### 20.B.2. «Équipements de production» spécialement conçus pour les sous-systèmes mentionnés par l'article 20.A

**Nature et But:** La production de ces sous-systèmes nécessite des équipements adaptés au type spécifique de sous-ensemble. Chaque installation de production de sous-système doit contenir de l'équipement spécialisé, des gabarits, des montages, des moules, des matrices et des mandrins qui sont utilisés pour fabriquer les composants du sous-ensemble, les assembler et tester le sous-ensemble.

**Mode de fonctionnement:** L'équipement utilisé pour construire les moteurs fusée à propergol solide comprend les machines de travail des métaux, les outils pour meuler, filtrer et mélanger le propergol, les moules ou mandrins pour former le noyau du moteur ou la surface de combustion, les dispositifs pour fabriquer et pyrolyser les tuyères du moteur, et le matériel pour tester le contrôle du vecteur poussée du moteur achevé. Les installations peuvent également contenir des équipements d'enroulement pour recouvrir les boîtiers de moteurs avec des matériaux composites à base de fibres.

Chaque composant d'un sous-système de propulsion de fusée à propergol liquide nécessite un équipement de production. Les vannes d'arrêt et de mise en marche des propergols nécessitent des fraiseuses pour fabriquer des pièces métalliques et du matériel d'essai d'écoulement et d'étanchéité pour le contrôle de la qualité. L'usinage par électroérosion (EDM) est largement utilisé dans la fabrication d'injecteurs pour moteurs fusée à propergol liquide. Au tout début, le processus était contrôlé par des dispositifs d'installation et des commandes manuelles. Les liaisons EDM et CAO/FAO commandées par ordinateur sont désormais la norme.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Les composants et assemblages produits à l'aide de l'équipement décrit dans cet article sont utilisés pour fabriquer et tester les articles énumérés à l'article 20.A.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Dans l'article 20.B.2., L'"équipement de production" est similaire à l'équipement des étages complets et des moteurs fusée à propergol solide, hybride ou à gel et des moteurs fusée à propergol liquide décrits au point 2.B.2. L'équipement décrit dans la présente rubrique peut ne pas être distingué de celui qui est conçu pour produire des étages de fusée ou des moteurs de fusée à propergol liquide de plus grande capacité. Cependant, il peut être de plus petite taille.

**Aspect (à l'emballage):** L'équipement de production décrit dans la présente rubrique peut être emballé selon les mêmes procédures et matériaux que ceux décrits à la rubrique 2.B.2 pour les étages complets et les moteurs fusée à propergol solide, hybride ou à gel et les moteurs fusée à propergol liquide.

### 20.C. Matériaux

Aucune.

## 20.D. Logiciel

### 20.D.1. «Logiciel» spécialement conçu ou modifié les systèmes mentionnés à l'article 20.B.1.

**Nature et But:** Les procédures de fabrication automatisées et assistées par ordinateur, y compris la commande numérique, sont de plus en plus utilisées pour produire des composants de missiles rapidement, avec précision et avec un degré élevé de répétabilité. Ces procédures nécessitent un logiciel spécifiquement conçu à cet effet

**Mode de fonctionnement:** Les machines-outils modernes sont à commande numérique par ordinateur (CNC). Un micro-processeur dans chaque machine lit le programme G-Code que l'utilisateur crée; il exécute ensuite les opérations programmées. Les ordinateurs personnels sont utilisés pour concevoir les pièces et sont également utilisés pour écrire des programmes, soit par saisie manuelle du code G, soit par l'utilisation d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO) qui crée le code G à partir des données saisies par l'utilisateur à l'aide de fraises et de parcours

**Utilisations typiques liées aux missiles:** L'équipement CNC est largement utilisé dans la fabrication et les essais de pièces de systèmes de missiles et s'appuie sur des logiciels internes et des logiciels FAO pour créer les différentes parties des systèmes de missiles. L'équipement CNC contrôle et gère à la fois le processus de fluotournage utilisé dans les installations de production de boîtiers de moteurs en acier et les machines de bobinage de filaments qui déposent des fibres revêtues d'époxy ou de résine de polyester sur des mandrins rotatifs pour créer des boîtiers moteurs composites. Les tours et fraiseuses CNC peuvent être utilisés pour transformer les billettes de graphite ou de carbone spécialisées en tuyères de moteur à propergol solide.

**Autres usages:** Les logiciels utilisés pour faire fonctionner l'équipement qui fabrique des sous-ensembles peuvent également être utilisés, avec des modifications, pour contrôler des produits fabriqués dans les industries de l'aviation civile et militaire.

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les médias communs comprenant la bande magnétique, les disquettes, les disques durs amovibles, les lecteurs flash USB, les disques compacts et les documents peuvent contenir ces logiciels et données.

**Aspect (à l'emballage):** La bande magnétique, les disquettes, les disques durs démontables, les disques compacts, les lecteurs flash USB contenant le logiciel de contrôle de production de missile sont indiscernables de tous les autres supports de stockage. Seuls l'étiquetage et la documentation d'accompagnement peuvent indiquer son utilisation à moins que le logiciel soit utilisé sur l'ordinateur approprié. Ce logiciel et cette documentation peuvent être transmis électroniquement sur un réseau informatique.

20.D.2. «Logiciel», non spécifié à l'article 2.D.2, spécialement conçu ou modifié aux fins de l'«utilisation» de moteurs-fusées ou moteurs mentionnés à l'article 20.A.1.b.

**Nature et But:** Le logiciel décrit dans cet article a la même nature et le même but que celui décrit à l'article 2.D.2.

**Mode de fonctionnement:** Le logiciel décrit dans cet article a la même méthode de fonctionnement que celle décrit à l'article 2.D.2.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** Le logiciel décrit dans cet article a les mêmes utilisations relatives au missile que le logiciel décrit dans l'article 2.D.2.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** Généralement, ce logiciel se présente sous la forme d'un programme informatique stocké sur un support imprimé, magnétique, optique ou autre. Tous les médias communs comprenant la bande magnétique, les disquettes, les disques durs amovibles, les lecteurs flash USB, les disques compacts et les documents peuvent contenir ces logiciels et données.

**Aspect (à l'emballage):** Le logiciel décrit dans cet article a le même aspect à l'emballage que celui décrit à l'article 2.D.2., et peut être transféré sur l'internet.

## 20.E. Technologie

20.E.1. «Technologie», au sens de la note générale relative à la technologie, pour le «développement», la «production» ou l'«utilisation» d'équipements ou de «logiciels» mentionnés aux articles 20.A, 20.B. ou 20.D.

**Nature et But:** La technologie visée à l'article 20.E.1. comprend les instructions et les connaissances nécessaires pour développer, produire ou utiliser tout équipement ou logiciel visé aux articles 20.A, 20.B ou 20.D.

**Mode de fonctionnement:** L'assistance technique est disponible sous plusieurs formes. L'assistance technique peut consister en un enseignement dispensé par une personne expérimentée dans une ou plusieurs matières contrôlées (comme les moteurs de fusée à propergol liquide) qui agit comme formateur dans une classe sur le site de production ou à proximité. Un pays peut recevoir une assistance technique d'un ou de plusieurs services de conseil spécialisés dans un processus contrôlé ou qui aident à l'acquisition de composants ou de matériaux difficiles à obtenir. Enfin, un pays peut recevoir une assistance technique en envoyant des étudiants dans d'autres pays possédant la technologie nécessaire pour suivre une formation et mettre en pratique les compétences nécessaires à la construction des systèmes requis. Tous les manuels et matériels reçus pendant la formation peuvent être considérés comme des données techniques.

**Utilisations typiques liées aux missiles:** A quelques exceptions près, l'assistance technique nécessaire à la construction de sous-ensembles de missiles n'est utilisée qu'à cette fin.

**Autres usages:** N/A

**Aspect (sortie d'usine)** N/A

**Aspect (à l'emballage):** N/A



## INDEX THÉMATIQUE

### A

accélérateur · 292, 293  
accéléromètre · 54, 190, 191, 192, 194, 202, 204, 209, 210,  
211, 254, 298  
additif (fabrication) · 47, 49, 51, 92, 93, 100, 114, 121  
aérothermodynamique (installation d'essai) · 295, 296  
altimètre · 43, 201, 231, 232, 233  
aluminium, aluminum · 121, 122, 127, 276 analogique / numérique  
(convertisseur) · 275  
assiette · 13, 24, 40, 88, 90, 118, 201, 202, 203, 219, 220,  
228  
Automatique (pilote) · 204, 219  
autonome · 16, 53, 250, 317, 334, 335, 336

### B

Bille (roulement à bille) · 80, 81  
béryllium · 121  
boron · 121, 122, 172  
Bremsstrahlung · 292  
broyeur à énergie fluide · 107, 112, 139

### C

conçu ou modifié · 12, 16, 17, 52, 59, 215, 236, 248, 251, 338,  
CAD/CAM · 49, 93, 345  
carbone-carbone · 48, 145, 161, 163, 165, 167, 172, 179  
carborane · 135  
carboranes · 135  
centrifuge · 209, 211  
céramique · 25, 49, 50, 83, 90, 152, 153, 154, 155, 169, 170, 171, 172,  
173, 182, 239, 271, 311, 322, 324, 345  
Chemical Abstracts Service - Numéro CAS · 119, 127 chlorate · 123  
chromate · 123  
chambre de combustion 93, 111, 20, 21, 29, 32, 33, 34, 37, 53, 61, 64, 76,  
77, 79, 80, 81, 84, 87, 88, 89, 90, 107, 118, 124, 138, 154, 155, 159, 160,  
161, 223, 290, 291, 296, 342  
composite · 4, 21, 26, 30, 33, 40, 47, 48, 51, 70, 75, 84, 92,  
93, 111, 114, 115, 116, 121, 130, 133, 137, 144, 145,  
146, 149, 150, 151, 155, 156, 161, 162, 164, 165, 166,  
169, 170, 172, 173, 174, 178, 180, 181, 233, 235, 237,  
245, 310, 311, 325, 342, 345, 346  
Calculateur (ordinateur) - code informatique · 3, 14, 15, 16, 17, 27, 36,  
49, 50, 51, 52, 53, 54,  
55, 56, 57, 58, 59, 66, 93, 99, 100, 101, 102, 139, 140,  
147, 149, 160, 179, 180, 181, 187, 199, 211, 212, 213,  
214, 215, 216, 219, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229,  
234, 238, 239, 242, 243, 244, 246, 249, 251, 256, 258,  
265, 266, 267, 268, 270, 271, 272, 273, 275, 276, 278,  
282, 283, 292, 298, 299, 302, 303, 304, 305, 306, 312,  
313, 314, 317, 318, 338, 345, 346, 347  
cubane · 121

### D

diffusiomètre · 208  
détecteur · 190, 194, 314, 317, 322, 323, 324, 326, 327

doppler · 201, 232, 233, 238, 242  
drone · 10

### E

électromagnétique · 28, 49, 93, 169, 172, 219, 231, 233, 234,  
254, 281, 309, 310, 313, 315  
électromécanique · 40, 46, 76, 140, 229  
érecteur-lanceur · 250  
ester · 116, 136, 137  
monomère éthylène-propylène-diène (EPDM) · 48, 70, 99  
explosif (boulon) · 73, 74, 75

équilibre (machine d'équilibrage) · 209, 210

### F

ferrocène · 134, 135  
fibre/remorquage (placement) · 146, 147, 148, 178  
filament (bande de) · 146, 148, 149  
filament (machine d'enroulement) · 146, 147, 148, 178  
furtivité · 9, 309, 310, 315, 319 moteur fusée, gel · 341  
fusée (Moteur hybride) · 20, 33, 34, 69, 79, 80, 99, 101, 130, 341,  
fusée (Moteur solide) · 20, 29, 30, 32, 33, 39, 40, 42, 65, 69,  
70, 79, 107, 114, 115, 116, 123, 128, 130, 132, 133, 138,  
144, 146, 164, 176, 223, 287, 288, 290, 292, 294, 341,  
342  
Fusée (étage) · 20, 21, 22, 23, 32, 35, 39, 75, 81, 82, 84, 287,  
341, 342, 344, 345

### G

portique · 146, 148, 149, 151, 248, 250, 288  
GNSS (système mondial de navigation par satellite) · 36, 332  
GLONASS · 236  
GPS · 10, 201, 202, 216, 236, 243  
gradiomètre · 254, 255  
graphite · 34, 48, 52, 75, 80, 93, 145, 158, 159, 162, 167,  
168, 169, 346  
gravimètre · 191, 254, 255, 256  
guidage (ensemble de) · 36, 37, 38, 40, 73, 190, 192, 193,  
194, 196, 219, 236, 245, 270  
gyro-astroscopique (compas) · 36, 187, 188, 211, 212  
gyroscope · 36, 50, 54, 186, 190, 191, 200, 201, 205, 208,  
209, 210, 211, 212, 214, 298  
gyroscopique (stabilisateur) · 194, 213, 219

### H

hafnium · 172, 173  
HALE · 7, 9, 62, 271, 331  
boucliers thermiques · 24, 25, 26, 27, 138, 144, 145, 149,  
150, 166, 172, 182  
dissipateur de chaleur · 26, 27, 239, 271, 276, 277, 145, 149,  
150, 304,  
hydraulique · 22, 40, 62, 73, 74, 75, 76, 77, 94, 95, 221,  
222, 223, 224, 228, 229, 251, 252, 298

hydrazine · 82, 83, 117, 118, 119, 122, 124, 126  
polybutadiène à terminaison hydroxyle (HTPB) · 116

## I

indicatrice (tête) · 210  
inertielle (mesure) · 36, 187, 199, 201, 202, 203, 204, 214, 215  
inertielle (navigation) · 9, 52, 191, 202, 204, 208, 213, 214, 238, 239, 242, 254, 332  
infrarouge · 88, 106, 140, 162, 233, 238, 260, 284, 298, 309, 315, 317  
isolation · 26, 48, 63, 69, 70, 71, 72, 81, 83, 92, 93, 97, 98, 99, 102, 107, 161, 200, 286, 292, 303, 305, 325  
instrument de vol intégré · 186, 187, 190, 191, 192, 193, 194, 199, 211, 212, 213, 214, 219, 234, 236, 270  
intégré (système de navigation) · 37, 56, 201, 202, 203, 215, 270  
interférométrie · 238  
interétage · 21, 73, 74, 75, 91, 99, 101, 102, 144, 149, 164, 176, 240, 241  
isostatique (presse) · 160, 161, 179, 180

## J

jet (aubes à) · 39, 41, 57, 172, 223, 228  
JP-10 · 121, 122

## L

laser · 43, 168, 194, 204, 208, 211, 212, 213, 214, 216, 224, 231, 232, 238, 242, 261, 262, 282, 337  
lancement (plateforme) · 240, 248, 250  
LIDAR · 231, 233  
leurre · 12, 13, 14, 46, 47, 49, 91, 92, 93, 94, 223, 224, 337, 338, 345

## M

moteur, turbine à gaz · 61, 62, 80, 84, 86, 100, 155, 170, 173  
machine à entrelacer · 178  
moteur, propergol liquide · 4, 18, 32, 39, 45, 46, 49, 51, 52, 53, 57, 59, 77, 82, 83, 91, 94, 100, 101, 103, 117, 124, 138, 178, 288, 298, 300, 341, 342, 344, 345, 348  
moteur, pulsoréacteur · 63, 64, 65, 93, 101, 102  
moteur, statoréacteur · 63, 64, 65, 66, 67, 93, 99, 101, 102, 121, 122, 155  
moteur, statoréacteur à combustion supersonique · 63, 64, 65, 93, 99, 101, 102  
moteur, turbopropulseur · 61, 62, 63, 65, 80, 85, 91, 92, 93, 99, 101  
moteur, turboréacteur · 61, 62, 63, 65, 80, 84, 85, 91, 92, 93, 99, 101, 155  
moteur, turbopropulseur · 80, 84, 85, 86, 87, 91, 92, 93, 101  
moteur, turbo-statoréacteur 65, moteur, cycle combiné · 63, 65

machine outil · 51, 99, 100, 346  
magnésium · 106, 121, 282  
magnétique (capteur de cap) · 203  
MALE · 7, 9, 331, 332  
mandrin · 12, 46, 47, 48, 51, 91, 94, 95, 107, 140, 144, 146, 148, 150, 164, 182, 345, 346  
maraging (acier) · 176, 177  
MARV · 23, 24  
mécanisme, séparation · 73, 74, 101, 102  
mécanisme, largage · 73, 74, 101, 102  
poudre métallique · 107, 114, 115, 121, 139, 140  
microcircuit · 28, 190, 237, 321, 322, 323, 324, 326, 327  
missile, balistique · 3, 4, 5, 6, 8, 17, 18, 21, 33, 35, 37, 40, 41, 44, 46, 57, 59, 69, 74, 79, 81, 82, 83, 85, 88, 89, 92, 101, 103, 115, 125, 130, 135, 144, 170, 172, 187, 190, 191, 199, 202, 217, 228, 231, 232, 233, 234, 239, 242, 245, 248, 249, 251, 254, 255, 256, 271, 276, 285, 295, 298, 300, 305, 307, 310, 314, 315, 317, 319, 322, 323, 324, 326, 327, 329, 330, 337  
mélangeur, par lot · 110, 111, 130  
mélangeur, continu · 110, 111, 130  
modélisation · 302, 303, 305, 306, 307  
molybdène · 159, 174, 175, 176  
mouvement, simulateur · 208, 210

## N

néoprène · 70, 99  
nitrique (acide) · 82, 106, 117, 125, 126, 127  
nitrile · 70, 99  
tuyère · 20, 21, 26, 29, 30, 32, 33, 34, 39, 40, 41, 46, 47, 48, 51, 52, 53, 57, 62, 64, 65, 69, 70, 71, 72, 75, 79, 82, 85, 87, 88, 89, 90, 93, 95, 99, 100, 102, 114, 115, 124, 144, 145, 151, 154, 155, 156, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 170, 172, 174, 175, 178, 179, 180, 181, 182, 219, 222, 223, 225, 286, 290, 292, 295, 296, 335, 342, 344, 345, 346

## O

Oxydant (comburant) 2, 12, 21, 29, 32, 33, 34, 48, 76, 77, 79, 80, 81,

82, 83, 87, 90, 91, 92, 97, 98, 112, 114, 116, 117, 118,  
121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 131, 132, 139,  
177, 178, 337

---

## P

Peinture 93, 112, 114, 121, 131, 144, 158, 310, 311, 315,  
316,  
Charge utile · 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 17, 18, 23, 24, 26, 27, 29,  
43,  
56, 58, 65, 73, 75, 81, 82, 108, 114, 146, 152, 172, 186,  
212, 233, 240, 270, 281, 302, 303, 305, 310, 312, 315,  
329, 330, 331, 332, 335, 337, 341  
perchlorate · 107, 116, 123  
Plasma (soufflerie) · 295, 296 plastifiant · 136 pneumatique  
· 73, 74, 75, 281, 332  
polyacrylonitrile (PAN) · 145, 152, 166  
polybutadiène · 70, 99, 116, 131  
polymère · 130, 131, 132, 133, 152, 153 table de  
positionnement · 210  
préimprégné · 148, 156, 164, 165, 181  
production (équipement de) 313, 12, 49, 93, 105, 107,  
108, 109  
113, 114, 139, 140, 141, 178, 207, 208, 216, 345  
production (installation de) · 10, 12, 15, 46, 47, 48, 91, 92,  
105, 252, 333, 337, 344, 345  
profilomètre · 208  
propergol · 3, 4, 14, 20, 29, 30, 33, 49, 73, 76, 81, 82, 87,  
89, 90, 93, 95, 98, 107, 108, 110, 113, 114, 115, 116,  
propergol, gel · 34, 35, 52, 53, 76, 83, 87, 88, 99, 101, 138,  
287, 341, 342, 344, 345  
propergol, liquide · 3, 4, 20, 21, 32, 33, 34, 35, 49, 77, 79,  
81, 82, 83, 84, 88, 91, 93, 105, 106, 121, 124, 138, 139,  
140, 141, 177, 329, 330, 345  
propergol, boue · 76, 107  
propergol, solide · 3, 4, 20, 21, 22, 30, 32, 33, 34, 45, 46,  
47, 48, 52, 53, 57, 64, 69, 70, 71, 79, 80, 82, 88, 92, 93, 94,  
97, 98, 99, 100, 102, 107, 108, 109, 111, 112, 114, 115,  
121, 123, 128, 130, 133, 135, 136, 137, 138, 139, 140,  
141, 172, 288, 292, 298, 330, 342, 344, 345, 346  
pyrolyse · 47, 180  
propulseur · 34, 53, 74, 90, 118, 219, 281, 282, 283, 291  
pose de ruban (machine) · 148, 149, 178

---

## R

radar · 10, 27, 29, 43, 45, 56, 169, 199, 201, 203, 213,  
214, 216, 231, 232, 233, 234, 238, 242, 257, 260, 309,  
312, 313, 314, 317, 318  
radar (surface équivalente) · 312, 318 radar,  
instrumentation à distance · 261 rayonnement (durci  
contre) · 28, 197  
radôme · 170, 318, 324, 325  
table de fréquence · 208, 209  
réservoir · 4, 12, 20, 21, 29, 32, 33, 34, 35, 40, 41, 46  
53, 59, 74, 76, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 91, 93, 95, 99,  
105, 114, 118, 119, 124, 125, 126, 127, 131, 138, 146,  
147, 152, 176, 178, 179, 194, 249, 250, 286, 287,  
288, 293, 335, 336, 337, 342  
réflectivité · 312  
réflectomètre · 208  
RV (véhicule de rentrée) · 17, 23, 32, 35, 45, 47, 50, 54, 56,  
58, 83, 88,  
145, 172, 197, 211, 239, 245, 285, 324

---

## S

stratifié · 144, 159, 164, 325  
(SAFF) sûreté, armement, allumage, mise à feu · 27, 28,  
43, 44, 45,  
56, 58  
SATCOM · 10, 258  
système contrôle propergol 76 propergol, double base ·  
114  
satellite · 2, 4, 32, 83, 84, 90, 115, 118, 126, 187, 223, 236,  
243, 245,  
258, 271, 276, 290, 303, 306, 310, 315, 317,  
322, 323, 330, 342  
SCADA · 14  
servovalve · 76, 77, 79, 91, 99, 101, 222, 223, 228  
Shaker (agitateur) · 281, 282, 291, 298  
carbone de silicium · 171, 172  
silo · 125, 240, 248, 250, 325  
simulation · 59, 102, 178, 216, 217, 225, 226, 227, 229,  
281,  
302, 303, 305, 306, 307, 339  
Spatiaux (lanceurs, SLV) · 2, 4, 21, 30, 32, 33, 40, 59, 77,  
79, 81, 82, 83, 88, 89, 115, 125, 165, 220, 248, 249, 263,  
300, 323, 330, 337

Spécialement conçu · 12, 16, 17, 22, 28, 38, 50, 52, 83, 84,  
95, 99, 101, 105, 150, 162, 207, 208, 214, 226, 236, 282,  
315, 316, 317, 318, 337, 338, 343  
système fusée · 2, 3, 4, 5, 12, 17, 20, 21, 26, 54, 55, 82, 83,  
91, 93, 115, 121, 122, 145, 167, 182, 186, 212, 213, 214  
215, 220, 221, 225, 226, 227, 236, 238, 251, 257, 260,  
266, 270, 273, 287, 302, 306, 307, 312, 329, 330, 337,  
339, 342  
sondes, fusée · 4, 18, 33, 59, 79, 100, 103, 228, 300,  
307, 330 118, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129,  
130,  
131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 139, 140, 141, 146, 152,  
176,  
223, 250, 287, 290, 292, 294, 330, 341, 342, 345  
stabilisant · 107, 136, 137, 139, 147  
strapdown · 38, 192, 194, 199, 204, 208  
système de suivi · 260, 261  
soufflerie · 224, 227, 228, 229, 284, 285, 286, 295,  
296,299

---

T

titane · 33, 40, 49, 63, 79, 84, 119, 172, 176, 177  
tungstène · 41, 172, 174, 175, 292  
turbopompe · 40, 53, 59, 76, 77, 78, 79, 80, 287, 292, 342  
télécontrôle · 256, 257, 258, 261  
Télémesure · 27, 56, 256, 257, 258, 260, 261, 263, 266,  
267, 268  
terrain · 9, 36, 189, 193, 231, 232, 234, 235, 238, 242, 254,  
255, 332  
thermique (batterie) · 263  
machine de tissage · 150, 151

---

U

UHTC (céramique ultra haute température) - 171, 172  
ombilical - 240, 241, 265  
UAV · 7, 61, 85, 115, 144, 231, 281,  
302, 310  
utilisable · 7, 20, 32, 178, 312, 323

---

V

Vapeur (dépôt en phase vapeur) · 153, 154, 167  
vertical (décollage et atterrissage) · 335  
vibration (test de) · 209, 281, 282, 283, 284, 291, 298, 299,  
300  
vecteur de poussée · 39, 40, 42, 47, 53, 57, 170, 173, 220,  
221,  
223, 225, 345  
Vol (système commande de vol) · 8, 16, 17, 36, 54, 187,  
213, 219, 220,  
221, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 331, 335

---

Z

zirconium · 121, 122, 173