

Enjeux de la propulsion solide des missiles stratégiques

Bruno Gruselle

(18 juillet 2008)



Édité et diffusé par la Fondation pour la Recherche Stratégique
27 rue Damesme – 75013 PARIS

ISSN : 1279-0257
ISBN : 978-2-911101-39-7
EAN : 9782911101397

SOMMAIRE

SYNTHÈSE – ENJEUX DE LA PROPULSION SOLIDE DES MISSILES STRATÉGIQUES PÉRENNITÉ ET DÉVELOPPEMENT DES SAVOIR-FAIRE NATIONAUX DANS LE DOMAINE DES PROPERGOLS SOLIDES	4
INTRODUCTION	8
1 – TECHNOLOGIES DE PROPULSION SOLIDE	11
1.1 – Conception et intérêt des propergols solides.....	12
1.2 – Développements nationaux en matière de propulsion solide.....	18
1.2.1 – Les grandes puissances balistiques.....	18
1.2.2 – Les autres puissances spatiales ou balistiques (Italie, Japon et Israël).....	24
1.2.3 – Les nouveaux entrants.....	26
1.2.4 – Qualité, sécurité et durabilité.....	29
1.2.5 – Conclusions	31
1.3 – Conditions du choix entre propulsion solide et liquide	33
2 – FUTURES CAPACITÉS STRATÉGIQUES ET PROPULSION SOLIDE	36
2.1 – Impact de l'évolution des projets américains de la nouvelle triade.....	37
2.1.1 – La défense antimissile	37
2.1.2 – Le programme de frappes conventionnelles rapides	42
2.2 – Évaluation des besoins français futurs en propulsion à vocation stratégique	46
2.3 – Entretien et accroissement du socle de compétences.....	47
CONCLUSIONS	58

Synthèse

Enjeux de la propulsion solide des missiles stratégiques **Pérennité et développement des savoir-faire nationaux** **dans le domaine des propergols solides**

Depuis l'utilisation des premiers propergols solides destinés à des applications stratégiques dans les années 1950, la France a développé une filière unique à la fois par sa spécificité technique et par son niveau d'avancement. En effet, le savoir-faire, les compétences et les connaissances acquises lors de la réalisation des programmes de propulsion destinés aux missiles de la force stratégique placent aujourd'hui la France parmi les États les plus avancés dans le domaine de la propulsion solide, à un niveau équivalent à celui des États-Unis. D'autres puissances balistiques, comme la Russie ou la Chine, sont capables de mettre au point des chargements de propergol solide permettant à leurs missiles d'atteindre des portées de plusieurs milliers de kilomètres mais, tant du point de vue des performances, de la fiabilité que de la sécurité, ces chargements ne présentent pas le même degré d'avancement technique que ceux que la SNPE en France, ou les deux motoristes américains ATK et Aerojet (dans une moindre mesure pour ce dernier), sont capables de produire.

Cette différence s'explique en grande partie par le fait que la plupart des puissances balistiques n'ont entrepris la mise au point de missiles balistiques utilisant des chargements à propergol solide composite que relativement tard. Ainsi, le premier missile soviétique lancé de sous-marin utilisant ce type de propulsion (SS-N-17 d'une portée d'environ 4 000 km) n'entre en service qu'en 1980 et il faut attendre 1984 pour que l'URSS déploie un engin intercontinental à propulsion solide sur ses sous-marins. Aujourd'hui encore, la mise au point d'un nouveau missile destiné à être déployé sur les sous-marins de la classe Borey, le SS-NX-30 Bulava, semble poser d'importantes difficultés aux bureaux d'études russes comme le montre la série d'échecs des essais en vol enregistrés par le programme. La République Populaire de Chine a engagé, quant à elle, ses programmes de missiles faisant appel à des propergols solides dans les années 1970, à la fois pour la mise au point de missiles tactiques (DF-11 et DF-15) et dans le cadre de la modernisation des capacités stratégiques du pays. Ce n'est qu'en 1985 que le DF-21, utilisant deux étages à propergol solide et d'une portée de 2 000 km, subit son premier essai en vol. Plus récemment, le DF-31, qui pourrait être décliné dans une version de 8 000 km de portée tirée de sous-marin, ne semble être entré en service pour sa version terrestre qu'à partir de 2006¹. Enfin, le Royaume Uni dispose pour sa force de dissuasion de missiles Trident II-D5 achetés, hormis les têtes nucléaires, aux États-Unis.

Parmi les puissances qui ont plus récemment investi le domaine des missiles balistiques à vocation stratégique, l'Inde est le pays le plus avancé. En effet, Dehli dispose grâce aux efforts investis dans son programme spatial de lanceurs spatiaux engagé dans les années 1970 – et qui a bénéficié pour une large part de transfert de technologie de la NASA –, d'une expertise certaine dans la formulation et la fabrication de propergols solides relativement avancés. Ainsi, les missiles de la famille AGNI, dont le plus récent aurait une portée de 4 000 km, démontrent que l'Inde possède un niveau technologique comparable à celui de la Chine.

¹ « China deploys new Dongfeng Missile », United Press International, 14 juin 2006.

Enfin, trois États, Israël, le Japon et l'Italie, possèdent via leurs programmes de lanceurs spatiaux ou leurs efforts dans le domaine balistique des degrés d'expertise relativement importants dans le domaine de la propulsion solide. L'Italie, notamment, a su investir le domaine en s'appuyant sur des financements de l'Agence Spatiale Européenne. En particulier, à travers les projets Ariane 5 et Vega, l'Agence Spatiale Italienne est parvenue à devenir l'un des maîtres d'œuvre principaux pour la partie propulsive des programmes européens.

Les États-Unis possèdent, au même titre que la France, une avance technologique et technique substantielle pour la conception, le développement et la production de chargements à propergol solide complexes, qui se traduit non seulement par la capacité de mettre au point de nouveaux chargements de propergols mais également à diminuer les coûts liés au développement et à maîtriser leur production industrielle. Or, les travaux engagés côté américain tant pour la composante antimissile que pour la conversion de missiles stratégiques pour des missions conventionnelles permettent aux deux motoristes que sont ATK et Aerojet de conserver et d'accroître leur potentiel technologique et technique. Le cas du programme *Kinetic Energy Interceptor* (KEI), système qui pourrait à terme remplacer les intercepteurs terrestres de la défense du territoire américain, est symbolique des efforts entrepris pour faire progresser la filière. Au cœur du projet se trouve en effet la mise au point de chargements de propergol solide de nouvelle génération, permettant des niveaux d'accélération et de vitesse finale très élevés². Même si l'arrivée d'une nouvelle Administration aux affaires en 2009 pourrait conduire à une évolution technique et financière du programme de défense antimissile tel qu'il a été engagé en 2000, les grandes lignes de celui-ci devraient rester identiques. Pour ce qui concerne le KEI – comme au reste d'autres systèmes considérés soit comme matures, soit comme prometteurs d'un point de vue technique – le consensus politique qui se reflète dans les choix budgétaires du Congrès élu en 2006 semble indiquer que le projet sera poursuivi.

Tant la conception que la mise au point et la fabrication des chargements de propergols solides composites présentent un caractère critique pour permettre à la France de disposer à long terme et de façon autonome des moyens stratégiques destinés à répondre à l'évolution de notre environnement international et aux menaces qui pourraient en découler. En particulier, le renforcement des capacités nucléaires russes, l'évolution des doctrines stratégiques chinoises et des moyens associés ou l'apparition de nouvelles puissances balistiques hostiles font partie des problématiques qui justifient l'amélioration continue de nos propres forces nucléaires. En effet pour répondre à ces évolutions, nos moyens balistiques et nucléaires devront vraisemblablement être améliorés pour offrir à nos autorités politiques des outils plus adaptés à un contexte caractérisé par des contraintes et des incertitudes géopolitiques importantes. En d'autres termes, nos systèmes stratégiques devront offrir plus de portée – ce qui implique notamment la pérennisation de la composante océanique –, de précision et de flexibilité tout en conservant, voire en améliorant, leur degré de fiabilité. Ainsi, il apparaît que la tendance générale d'évolution du besoin en matière de missiles balistiques à un horizon temporel lointain se traduit par la nécessité de mettre au point et de produire des chargements à propergol solide qui seront plus performants que ceux existant aujourd'hui. Ce constat amène à considérer que la conservation et l'amélioration de nos compétences nationales dans les domaines

² L'objectif pour le KEI est une vitesse finale de l'ordre de 7 km/s (à terme une version pouvant atteindre 8 km/s est envisagée). Voir <http://www.janes.com/extracts/extract/jsws/jsws9078.html>

techniques clefs de la conception et de la réalisation de missiles – en particulier pour ce qui concerne la propulsion solide stratégique – constituent une priorité afin de garantir l’avenir de notre politique de sécurité.

Du fait de son caractère spécifique et très peu dual, la filière de la propulsion solide composite s’avère aujourd’hui particulièrement fragile. En effet, la coïncidence de la fin des programmes de développements de missiles balistiques et de lanceurs spatiaux crée en France une situation exceptionnelle de vulnérabilité. Une fois achevé le développement du M-51, aucun effort de recherche et de développement de longue durée n’a été encore planifié pour permettre de sauvegarder les savoir-faire critiques qui permettraient de lancer à l’horizon 2030 un nouveau programme de vecteurs destinés à notre force stratégique. La mise au point de chargements de propergol ayant les performances requises pour remplir une gamme plus large de missions nécessite non seulement la conservation mais également l’accroissement du savoir-faire dont dispose aujourd’hui notre tissu industriel.

Ce savoir-faire repose essentiellement sur l’expérience accumulée par la SNPE dans la formulation, la conception et la réalisation de propergols composites, c’est-à-dire dans une branche particulière de la Chimie. Ce métier de « chimiste », qui fait la spécificité de la société, l’a conduite à développer à la fois des processus industriels innovants mais également à entretenir une base scientifique et technique faisant appel à un large éventail de disciplines scientifiques. Cette interaction permanente entre la pratique du développement de chargements à finalité opérationnelle et les études amont constitue l’un des points clefs des progrès réalisés depuis 50 ans. Elle s’accompagne par ailleurs de la constitution d’un tissu professionnel formé d’équipes ayant participé au développement à la fois des chargements destinés aux missiles stratégiques français (M-4, M-45 et M-51) et des moteurs à propulsion solide (MPS) d’Ariane 5. Enfin, le développement de cette filière a été rendu possible par la mise en place de capacités de production uniques en Europe, à la fois pour les chargements mais également pour les matières premières critiques destinés à leur fabrication (e.g. perchlorate d’ammonium).

De fait, l’évolution du contexte budgétaire et politique national ainsi que le vieillissement des équipes techniques qui ont mené les développements des chargements à propergol solide depuis les années 1970 jusqu’à aujourd’hui, conduisent à s’interroger sur les conditions dans lesquelles cette filière pourrait poursuivre son développement. D’un point de vue budgétaire, force est de constater que la diminution des investissements de défense et les montants encore limités affectés aux études amont risquent de se traduire par une interruption du cycle "développement-production" crucial pour assurer l’efficacité de la filière. Au niveau politique, si le rôle central de la dissuasion nucléaire pour la sécurité de nos intérêts vitaux ne semble pas devoir être remis en cause, la structure qualitative et quantitative actuelle de nos systèmes d’armes nucléaires pourrait faire l’objet de débats périodiques (par exemple à chaque élection présidentielle). Du point de vue des vecteurs, les révisions stratégiques pourraient se traduire par des demandes de performances accrues en termes de portée et de précision s’inscrivant dans une logique d’évolution des charges nucléaires.

La poursuite des progrès techniques et industriels nécessaires pour atteindre un éventuel objectif de ce type, de façon autonome, nécessite en conséquence de prendre des mesures spécifiques. Il convient de souligner que celles-ci devront permettre à la fois de conduire des activités de développement mais également des travaux de production, *a*

minima sur des démonstrateurs en grandeur réelle, afin de sauvegarder la synergie entre le développement et la fabrication. Plusieurs pistes peuvent être envisagées :

- ➔ Le lancement d'un projet de mise au point d'un démonstrateur d'intercepteur exoatmosphérique ou haut endoatmosphérique dans le cadre d'un programme européen ou transatlantique de défense antimissile revêt des intérêts à la fois politiques et techniques. De ce dernier point de vue en effet, les chargements de propergol solide nécessaires ont un caractère techniquement proche de ceux destinés à des applications offensives : dimensions, performances énergétiques, fiabilité et durée de vie. Les efforts engagés pourraient donc efficacement permettre d'accroître des compétences nécessaires à l'évolution éventuelle et au maintien en condition de nos capacités stratégiques nucléaires.
- ➔ Engager le développement d'un démonstrateur de propulseur de nouvelle génération dont les performances visées seraient déduites d'une étude prospective des besoins envisageables à l'horizon 2015.

Ces deux solutions exigent un effort budgétaire soutenu pendant une période assez longue, qui s'étend vraisemblablement jusqu'au milieu de la décennie 2020 afin d'être en mesure à cette échéance de pouvoir remplacer, si nécessaire, les étages propulsifs des missiles entrant actuellement en service. Elles doivent également profiter des synergies qui pourraient exister avec les programmes de missiles tactiques et de propulsion spatiale.

Notre participation aux programmes spatiaux européens, comme contribution potentielle à une reprise d'activité dans le secteur des missiles stratégiques, représente la solution la moins adaptée pour répondre à la question du développement des compétences nationales. En effet, les besoins en matière de propergol solide pour la propulsion spatiale sont, maintenant, relativement différents de ceux relatifs aux missiles balistiques. Néanmoins, elle permettrait théoriquement d'entretenir un niveau de savoir-faire suffisant pour concevoir des chargements rustiques destinés à ces derniers, à condition que nous conservions une maîtrise propre du développement et de la production des chargements de propergol, ce qui est loin d'être assuré étant donnée la position de l'Italie dans le secteur spatial. La mise en place d'un programme de développement pour un lanceur national à propulsion solide rustique (c'est-à-dire utilisant des technologies éprouvées)³ pourrait par exemple être envisagée afin de conserver la maîtrise d'œuvre de l'ensemble du système, de la conception à la fabrication. Elle apparaît cependant peu vraisemblable étant donnée la gamme de lanceurs disponibles actuellement.

La filière française de la propulsion solide à vocation stratégique se trouve donc dans une situation exceptionnelle qu'elle n'a jamais connue depuis sa mise en place à la fin des années 1950. Celle-ci est caractérisée par une rupture du cycle de développement-production qui, jusqu'ici, avait permis de conserver et d'accroître le potentiel technique et scientifique de notre tissu industriel, avec pour conséquence l'amélioration des performances des chargements, de leur fiabilité et de leur sûreté en conformité avec les besoins exprimés par les autorités politiques. La fin de la période de développement des moteurs du missile M-51 pourrait conduire à l'attrition puis à la disparition de compétences spécifiques et uniques qui ne pourront réapparaître que moyennant des investissements lourds. Pour éviter que ce scénario ne se réalise, il est impératif d'offrir dès maintenant à cette filière des perspectives en termes de programmes.

³ Un lanceur ayant une capacité d'emport de quelques tonnes à faible coût de développement et de fabrication.

Introduction

La nature stratégique de la propulsion par propergol solide tient d'abord à son emploi quasiment systématique pour la motorisation des principaux missiles des forces nucléaires océaniques des pays dotés. États-Unis, Russie, France ou encore Royaume Uni (dont les missiles sont des Trident II-D5 américains et les têtes d'origine britannique) et Chine possèdent ou développent des sous-marins équipés de missiles à propulsion solide offrant des garanties de sécurité et d'efficacité que les systèmes à ergols liquides ne permettent pas. Dans ce domaine, les améliorations apportées aux chargements propulsifs ont permis un accroissement substantiel des performances des engins en termes de portée notamment. De plus, les caractéristiques opérationnelles des propergols solides (disponibilité, facilité de stockage, absence de maintenance) les rendent particulièrement appropriés à des utilisations dans les conditions particulières qui sont celles d'un emploi depuis une plate-forme sous-marine ou navale mais également pour les applications missiles visant à réduire les délais entre la décision d'un lancement et le tir effectif.

Mais elle tient également au rôle que la propulsion solide joue pour la motorisation des lanceurs destinés à des applications spatiales. Les deux domaines sont d'ailleurs liés tant les progrès en matière de recherche alimentent les deux filières, comme le montrent les efforts parallèles menés sur le missile M-51 et les moteurs à propergols solides (MPS) d'Ariane 5. Le lien entre applications spatiales et stratégiques s'illustre également aux États-Unis par le rôle clef que joue *Alliant Techsystems* (ATK) dans la conception et la réalisation des moteurs des engins Trident II, de l'intercepteur antimissile *Ground Based Midcourse Defense* (GMD), du *Kinetic Energy Interceptor* (KEI) et des MPS de la navette spatiale. Le programme de missile indien AGNI offre une autre illustration de cette proximité technologique, la motorisation par propergol solide de ces engins étant le résultat d'une coopération entre l'agence spatiale ISRO (*Indian Space Research Organisation*) et l'organisation de recherche et de développement de défense DRDO (*Defence Research and Development Organisation*). A la lumière de ces exemples, il existe à l'évidence une dualité profonde en matière de propulsion entre les développements destinés au domaine spatial et ceux des secteurs militaires stratégiques.

Côté américain, le développement de la capacité de défense antimissile constitue aujourd'hui le troisième pilier qui innerve l'activité de l'industrie de la propulsion solide. En effet, les niveaux d'accélération requis autant que les vitesses finales nécessaires pour l'intercepteur justifient le choix et le développement de propergols solides de préférence à des ergols liquides. En outre, l'emploi de propergol solide permet d'assurer une réactivité permanente que n'autoriserait pas l'utilisation de moteurs à ergols liquides. Or, même si l'administration qui sera élue en 2008 pourrait être amenée à auditer les programmes de défense antimissile tels qu'ils ont été menés depuis 2001, cet exercice visera sans doute davantage à ajuster la gestion et le financement plutôt qu'à remettre en cause les principales orientations.

En particulier, la question de l'extension du projet aux alliés européens devrait continuer à être d'actualité, même s'il est probable qu'elle se pose davantage en termes d'articulation entre les moyens dont disposerait l'Alliance atlantique et ceux dont Washington aurait négocié l'implantation chez certains de ses partenaires. Dans ce contexte, la nature et l'étendue des contributions de chaque allié au système assurant une protection générale deviendraient vraisemblablement des éléments clefs du débat européen et transatlantique.

Or, en la matière, plusieurs pistes méritent d'être explorées :

- ➔ L'apport par les Européens d'un système d'interception complet comprenant des composantes endo et/ou exoatmosphériques ainsi que des moyens de détection et de trajectographie associés.
- ➔ La mise en place de moyens complémentaires de ceux des États-Unis dans certains domaines jugés critiques (alerte, commandement).
- ➔ Une participation technique à un projet de développement transatlantique apportant un ou des savoir-faire spécifiques aux Européens. Cette dernière solution présente l'intérêt de réduire, de façon substantielle, le coût financier d'une participation européenne à un système de défense antimissile de l'Alliance. Toutefois, ces conditions pratiques de mise en œuvre dépendent de nombreux facteurs politiques, techniques et industriels.

Quels que soient les choix politiques qui seront effectués, il est essentiel de souligner que la France possède, grâce à des investissements de long terme, une série de compétences techniques et industrielles qu'elle peut faire valoir aux niveaux européen et américain. Parmi celles-ci, la propulsion solide semble occuper une place particulière du fait de son savoir-faire et de travaux de recherche et de développement uniques en Europe.

Il reste toutefois à établir dans quelle mesure cette compétence offre à la France une position stratégique à moyen et long termes. Pour ce faire, il semble d'abord utile de montrer l'intérêt technique des solutions de propulsion à base de propergols solides, en particulier pour les applications à caractère stratégique mais également pour des systèmes à vocation tactique, par rapport à celles utilisant des ergols liquides. De la même façon, il paraît nécessaire d'évaluer quel est le niveau relatif des technologies maîtrisées par la France par rapport à celles dont disposent les autres pays, occidentaux ou non, ayant un savoir-faire en matière de propulsion solide.

Tout porte à croire que, du fait du caractère clef des propergols solides pour les applications stratégiques, les évolutions techniques possibles dans le domaine de la propulsion solide seront amenées à peser lourdement sur les capacités futures des États. Ainsi, les choix qui peuvent s'offrir en matière de développement dans le domaine doivent être évalués au regard des développements envisageables en matière de défense antimissile comme de capacité de frappes. *A contrario*, il paraît nécessaire de déterminer quelles seraient les conséquences à long terme d'une réduction des efforts destinés à améliorer ces compétences techniques et industrielles. En particulier, pour ce qui concerne la pérennité et la capacité à progresser de nos moyens stratégiques et, le cas échéant, en termes d'indépendance de notre capacité d'expertise et de production.

De fait, les orientations qui seront retenues par les États-Unis dans les deux domaines s'avèrent être des éléments clefs pour le débat transatlantique et européen. Or, plusieurs facteurs devraient être amenés à façonner l'évolution de ces deux systèmes côté américain :

- ➔ Au niveau politique d'abord, la structure des projets lancés par l'administration Bush peut être amenée à évoluer en fonction des impératifs internationaux. Par exemple, les coopérations bilatérales envisagées dans le cadre de l'implantation de moyens de défense antimissiles en Europe peuvent être remises en cause par les pays concernés. De la même façon, la gestion de la relation avec la Russie peut conduire Washington à faire évoluer ses projets, par exemple en replaçant l'Alliance

atlantique au cœur de l'animation d'un programme commun. Par ailleurs, les réticences financières des alliés peuvent constituer un frein à des initiatives qui seraient jugées comme trop ambitieuses et qui se trouveraient donc fortement ralenties par les instances décisionnaires de l'OTAN.

- ➔ En termes opérationnels, l'émergence aux États-Unis d'une nouvelle triade stratégique s'appuyant, en sus d'armes nucléaires, sur deux composantes conventionnelles (défensive et offensive) pourrait donner un rôle central aux missiles balistiques équipés d'ogives non nucléaires pour des missions ponctuelles contre des objectifs politiques de haute valeur. Des travaux portant sur les possibilités techniques de conversion de missiles stratégiques pour des missions de frappes rapides ont été engagés à la fois au sein de l'*Air Force* et de la *Navy*⁴. Or, l'une des spécificités de la nouvelle triade tient à la nécessité d'y intégrer, en sus des moyens nationaux, des capacités étrangères. Il peut du reste s'agir de disposer de facilités d'implantation géographique à l'extérieur du territoire des États-Unis⁵ comme de moyens qui devraient être intégrés dans la boucle de commandement américaine.
- ➔ D'un point de vue financier, l'accroissement substantiel du budget de défense américain du fait de la conduite d'opérations en Irak et en Afghanistan pourrait conduire la prochaine administration à renoncer à certains projets, ou du moins à réduire fortement les financements qui leur sont consacrés. Un tel ajustement pourrait mener à adapter la mise en œuvre de la nouvelle triade en donnant la priorité à des coopérations internationales.

Face aux incertitudes qui caractérisent la politique américaine en matière de capacités stratégiques, il apparaît nécessaire pour les pays européens et pour la France en particulier de définir des niches technologiques qui pourraient lui permettre à terme de peser sur les projets de Washington. Vu de Paris, il s'agit également de choisir des investissements qui répondent à ses propres intérêts de sécurité et soient réalisables en termes de capacités industrielles et financières.

⁴ B. Gruselle, « Nouvelle triade, conventionnalisation des moyens de dissuasion et équilibres stratégiques », FRS, *Recherche et Documents*, 8 janvier 2008, p. 22.

⁵ La possibilité de mettre au point des missiles balistiques de portée intermédiaire (moins de 5 500 km) pour remplir des missions de frappes conventionnelles pourrait en particulier conduire à des déploiements hors du territoire américain. Amy F. Woolf, « Conventional Warheads for Long-Range Ballistic Missiles: Background and Issues for Congress », Congressional Research Service, updated March 13th, 2006, p. 25.

1 – Technologies de propulsion solide

La propulsion anaérobie, c'est-à-dire n'utilisant pas l'oxygène présent dans l'atmosphère pour fonctionner, constitue un moyen privilégié pour permettre le vol d'engins évoluant pour une partie de leur trajectoire hors de l'atmosphère terrestre. Elle est donc particulièrement adaptée aux lanceurs spatiaux ainsi qu'aux missiles balistiques, ces derniers étant historiquement les premiers à disposer de moteurs de ce type.

Dans un moteur anaérobie, la poussée est obtenue grâce à la combustion d'un agent propulsif (ou propergol) stocké à l'intérieur de l'engin. Un propergol est constitué de deux éléments de base – un combustible et un comburant – qui associés sont susceptibles de produire la combustion souhaitée.

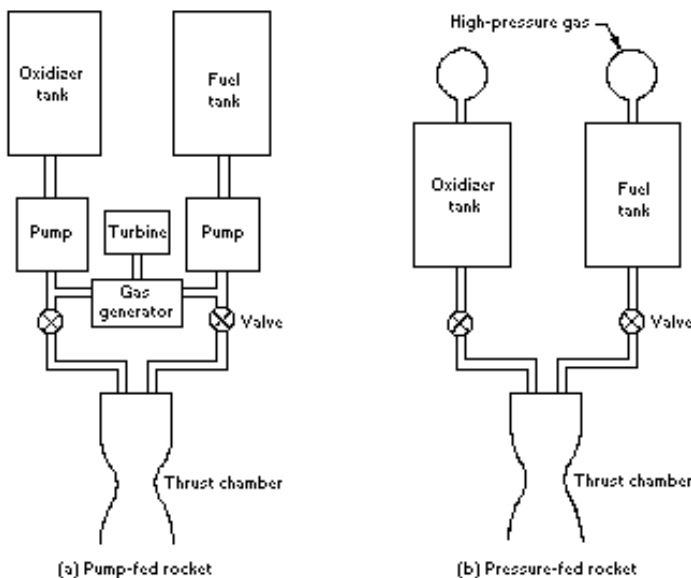


Figure 1 : Schéma de principe propulsion liquide

La différence entre propulsion solide et liquide tient non seulement à l'état physique de ces composants (ou ergols) mais également à la méthode de mélange et de combustion. Ainsi, dans un moteur à propulsion liquide, les deux ergols sont stockés séparément et injectés dans la chambre de combustion pour y brûler.

Pour un propergol solide, les différents constituants sont au contraire stockés directement dans la chambre de combustion à l'état prémélangé appelé chargement.

Lorsque les premiers engins balistiques sont conçus au début des années 1950, les performances des propergols solides sont insuffisantes et limitent leur utilisation aux moteurs de courte durée de combustion, de sorte que l'on s'oriente d'abord vers l'emploi de moteurs à ergols liquides.

Toutefois, cette situation évolue avec la maîtrise de la combustion des propergols solides permise par l'emploi de revêtements inhibiteurs de combustion, empêchant celle-ci de se propager sur certaines faces du chargement. Ainsi, il devient possible de réaliser des formes de chargement de propergol assurant de longues durées de combustion et une protection plus efficace des parois internes du moteur. De la même façon, la mise au point de nouvelles techniques de fabrication rend possible l'élaboration de blocs de grandes dimensions capables de brûler pendant des durées suffisamment longues pour offrir une portée accrue aux engins qui en sont équipés.

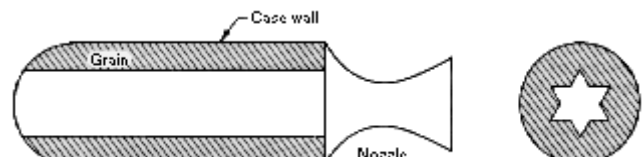


Figure 2 : Schéma de principe propulsion solide

L'évolution vers la propulsion solide s'avère d'autant plus intéressante du fait de la disponibilité immédiate des propulseurs à ergols solides, qui constitue un avantage primordial pour la mise en œuvre opérationnelle des missiles. En effet, dans ce type de propulseur, le propergol est placé directement dans la chambre de combustion, lors de la fabrication industrielle des moteurs, ce qui conduit à un fonctionnement relativement simple et fiable (pas de dispositifs d'injection et de contrôle du mélange des ergols), et permet une mise en œuvre facile et rapide du missile, celui-ci pouvant être stocké et manipulé « prêt à l'emploi ». De plus, les propergols solides permettent de s'affranchir des problèmes de corrosion ou de volatilité posés par certains ergols liquides, qui imposent de remplir les réservoirs peu avant le tir et pénalisent la sûreté d'emploi de l'engin.

Néanmoins, les moteurs à propergol liquide continuent à offrir certains avantages spécifiques, qui font qu'ils restent intéressants pour assurer la propulsion de certains engins. Leur principal avantage réside dans la plus grande souplesse d'emploi du propulseur : l'utilisation de certains ergols liquides⁶ permet en effet de réaliser, si cela s'avère nécessaire, une extinction et un éventuel réallumage du moteur⁷. Il est ainsi possible de commander précisément un arrêt de poussée d'un système à propulsion liquide et, dès lors, de moduler la portée d'un missile et d'améliorer sa précision. Généralement, les ergols liquides présentent également de meilleurs rendements énergétiques que la majeure partie des propergols solides. Cette comparaison reste toutefois assez difficile à soutenir pour les systèmes modernes dans la mesure où la caractérisation de l'efficacité des ergols dépend de plusieurs facteurs (impulsion spécifique, densité/masse). En outre, le gain en termes d'impulsion spécifique peut être obéré par l'augmentation des masses inertes des divers dispositifs de stockage et d'injection des ergols liquides.

1.1 – Conception et intérêt des propergols solides

Un moteur à propulsion solide est donc constitué de trois principaux sous-ensembles qui doivent être fabriqués séparément puis associés pour permettre le fonctionnement :

- ➔ Le chargement de propergol : il existe deux grandes familles de propergol utilisées pour la propulsion que l'on distingue essentiellement par le degré d'homogénéité du mélange entre le combustible et le comburant. En premier lieu, les propergols dits double-base sont constitués d'un mélange de molécules – en général de nitrocellulose et de nitroglycérine – qui se présente extérieurement comme homogène. L'utilisation de ce type de mélange est limitée à des missiles tactiques ou à des accélérateurs de poussée du fait des limitations existantes en diamètre⁸. Deuxième grande famille, les propergols composites résultent d'un mélange distinct des composants combustibles et comburants auxquels peuvent être ajoutés des additifs divers permettant, par exemple, de modifier la vitesse de combustion du propergol. En pratique, le comburant est un sel minéral oxygéné (perchlorate d'ammonium principalement)

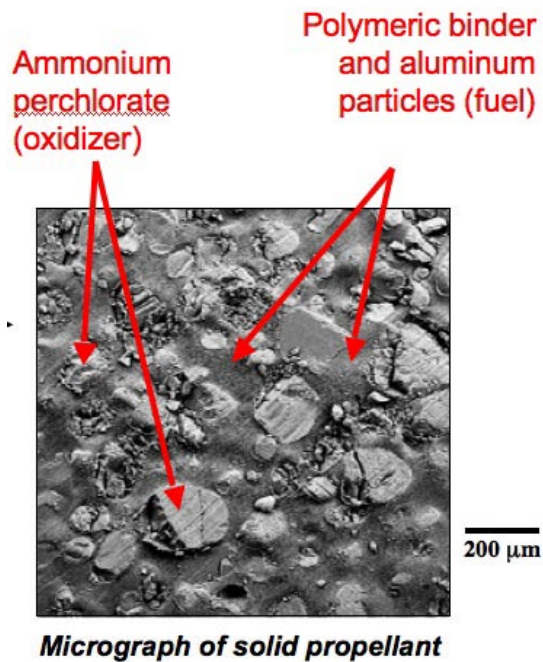
⁶ Il s'agit des ergols dits hypergoliques qui lors de leur mélange brûlent spontanément.

⁷ Cet avantage de la propulsion liquide s'applique en général aux étages supérieurs des lanceurs ou missiles. Pour les étages inférieurs, qui nécessitent une forte poussée, la propulsion par propergols solides est plus avantageuse.

⁸ Pour un propergol double-base extrudé le diamètre maximum est limité à environ 300 mm. Il peut toutefois atteindre des tailles plus importantes pour les propergols double-base moulés (ou Epictète). Voir A. Davenas, « Technologie des propergols solides », Éditions Masson, 1989, pp. 404-405.

dispersé dans un combustible hydrocarboné qui tient lieu à la fois de support et de liant. L'ajout d'éléments métalliques au sein de la matrice ainsi obtenue (e.g. particules d'aluminium) permet d'accroître les deux caractéristiques clefs du propergol, à savoir sa densité et son impulsion spécifique.

Figure 3 :
Image micrographique
d'un chargement
de propergol composite



- ➔ Le corps du propulseur contient le chargement de propergol et participe à la fois à la tenue mécanique et thermique de l'engin. En effet, il doit être conçu pour subir des contraintes importantes, en particulier lors du vol⁹, qu'il s'agisse des pressions et températures élevées créées par la combustion du propergol ou des forces aérodynamiques qui s'exercent sur l'engin. Les matériaux utilisés peuvent être soit des métaux (aciers à haute résistance ou alliages à base d'aluminium ou de titane), soit des assemblages filamenteux (fibres bobinées en carbone pour les moteurs les plus performants). La protection thermique interne doit être assurée. On utilise pour ce faire des protections thermiques souples, composées de caoutchoucs plus ou moins chargés en poudre ou en fibres réfractaires (carbone, silice...), ou des protections thermiques rigides, constituées d'un matériau composite à base de carbone ou de graphite (sous forme de fibres ou de tissus) et de résine époxy. Un lieur (ou liner) assure la liaison entre le chargement de propergol et la protection thermique collée dans la structure.
- ➔ La tuyère permet l'écoulement, la détente et l'éjection des gaz provenant de la combustion du chargement de propergol. En dehors de son profilage, qui détermine l'efficacité du système propulsif, la tuyère doit à la fois supporter de fortes températures (qui peuvent dépasser 3 000 K) et, éventuellement, subir les phénomènes d'érosion engendrés par la présence dans le jet de gaz de particules condensées issues de la combustion du propergol (alumine). Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour la fabrication des tuyères : graphite, composites à base de carbone et de résine ou carbone-carbone.

⁹ Mais également au sol lors des phases de manutention. Le corps doit également être capable de supporter le poids de l'engin.

Bien que la chimie se trouve au cœur du savoir-faire nécessaire à la conception et à la fabrication des propergols solides, elles font en réalité appel à un ensemble de compétences et de savoir-faire divers allant de la mécanique des milieux continus jusqu'à l'aérodynamique et incluant la thermodynamique ou encore « l'aérothermochimie » multiphasique.

Ainsi, l'élaboration et la production des propergols sont souvent considérées comme des étapes particulièrement critiques dans la mesure où la mise au point requiert un grand nombre d'essais¹⁰ visant à assurer à la fois la tenue mécanique du chargement et une combustion conforme aux performances attendues. Dans ce dernier domaine, les essais au banc s'avèrent cruciaux, mais l'exploitation des données recueillies peut s'avérer particulièrement difficile, notamment en cas d'échec¹¹. Rendu possible par l'augmentation constante des capacités de calculs mathématiques, le développement d'outils de simulation permettant l'étude des phénomènes complexes qui se déroulent lors de la combustion des chargements de propergols contribue à une plus grande prévisibilité des comportements des moteurs et à une moindre dépendance envers les capacités d'essai. Toutefois, la mise au point et l'utilisation de ces outils requièrent une connaissance des phénomènes se déroulant lors de la combustion d'un propergol qui ne peut être acquise qu'à travers l'expérience de leur développement, et donc, l'existence d'une culture expérimentale dans le domaine.

Dans la phase de fabrication, la réalisation de blocs les plus homogènes possibles, présentant une surface de combustion conduisant à la loi de poussée souhaitée, tout comme la réalisation de la liaison entre le propergol et le corps du propulseur s'avèrent délicates. Les problèmes de qualité qui peuvent apparaître lors de cette phase sont susceptibles d'entraîner d'importants dysfonctionnements lors de l'utilisation du moteur, allant jusqu'à la destruction de celui-ci¹². En particulier, l'intégrité du chargement (par exemple, l'absence de porosités et de fissures), des problèmes de collage entre le propergol et la protection thermique de la structure ou encore des instabilités lors de la combustion du chargement peuvent être les causes d'incident lors de la phase de propulsion. Dès lors, l'accès à des moyens de contrôle non destructifs permettant de s'assurer de la qualité des propergols (par rayons X, ultrasons, imagerie thermique) constitue un impératif pour atteindre un niveau suffisant de confiance autorisant une utilisation militaire ou spatiale.

¹⁰ C'est-à-dire à la fois des essais en grandeur nature en nombre limité (sur banc) mais également de nombreux tests en laboratoire sur des éprouvettes du chargement pour en mesurer par exemple les performances mécaniques.

¹¹ <http://quest.nasa.gov/space/teachers/rockets/rocketry.html>

¹² Un manque d'étanchéité à la jonction entre deux segments de propergol avait causé l'accident de la navette Challenger en 1986. Voir <http://www.centennialofflight.gov/essay/SPACEFLIGHT/challenger/SP26.htm>

Figure 4 :
Dispositif de coulée en puits
pour propergol composite
de fort diamètre



Plusieurs méthodes de fabrication existent pour les propergols solides composites, mais la technique la plus fréquemment utilisée comprend quatre étapes :

- ➔ Enduction de la structure : il s'agit d'enduire la protection thermique à l'intérieur du corps du propulseur avec une résine, le lieur, qui assurera la liaison entre la structure et le chargement en propergol solide.
- ➔ Malaxage du propergol : les divers éléments (oxydant, réducteur, liant et additifs) sont mélangés de façon intime sous forme d'une pâte. Pour les blocs de grandes dimensions, plusieurs pré-mélanges sont effectués du fait des limites de la taille des malaxeurs, le réticulant¹³ permettant la polymérisation de l'ensemble n'est ajouté que juste avant la coulée.
- ➔ Coulée et réticulation : le propergol à l'état pâteux est versé, sous pression réduite, dans un dispositif comprenant la structure ainsi qu'un noyau central qui donnera *in fine* la forme du canal interne du propergol. Une fois obtenue la polymérisation, le noyau central est retiré. Cette dernière opération s'avère plus ou moins complexe selon les formes souhaitées pour le canal central – et donc pour la loi de poussée de l'étage considéré. En effet, l'extraction doit minimiser à la fois les risques pyrotechniques et éviter que des dégâts de surface soient causés au propergol.
- ➔ La tuyère, ainsi que les éventuels dispositifs de pilotage de celle-ci, et le dispositif d'allumage du propergol solide sont assemblés avec le chargement constitué pour former le moteur.

Les opérations et le matériel nécessaire pour la fabrication dépendent concrètement des dimensions du propulseur, depuis des systèmes relativement simples pour les chargements de propergol de faible diamètre jusqu'à des bâtiments spécialisés abritant des puits de coulée pour ceux de grandes dimensions. De fait, ces variétés d'équipements et d'installations, qui se reflètent également pour les dispositifs d'essai, expliquent pour l'essentiel la différence technologique qui existe entre la production en série de moteurs

¹³ Produit qui permet la polymérisation du liant.

de petite et de grande taille, qui peut s'accroître selon la nature du chargement et la complexité de la forme du canal central.

Une autre difficulté vient de la production ou de l'acquisition des matières premières qui doivent être mélangées pour constituer le chargement de propergol solide. En effet, la taille et la forme des particules incluses dans la matrice influent sur les propriétés du propergol lors de sa combustion. Ainsi, seuls quelques pays possèdent des entreprises capables de produire du perchlorate d'ammonium ayant des granulométries adaptées à des applications de propulsion (Brésil, Chine, Corée du Sud, États-Unis, France, Japon, Russie et Taiwan¹⁴). De la même façon, l'accès à l'ensemble des additifs nécessaires qui peuvent être utilisés dans certaines formulations s'avère crucial pour le fonctionnement de la production.

Malgré les difficultés et les risques liés à leur conception et à leur fabrication, les propergols solides présentent plusieurs avantages intrinsèques vis-à-vis des moteurs à ergols liquides :

- ➔ Si leur impulsion spécifique – qui mesure l'impulsion obtenue par unité de masse du propergol dans des conditions données¹⁵ – est généralement inférieure (environ 300 s dans le vide contre 350-400 secondes pour un moteur à propulsion liquide), l'accélération initiale obtenue pour une masse équivalente de propergol est généralement très supérieure. De fait, les propergols solides sont souvent utilisés pour fournir d'importantes accélérations aux engins propulsés. La mise au point de propergols ayant des caractéristiques énergétiques plus importantes, par exemple via l'utilisation de liant actif ou de molécules plus énergétiques¹⁶, permet aujourd'hui de réduire la différence de performances énergétiques entre propergols solides composites et ergols liquides. De la même façon, les progrès qui peuvent être réalisés dans les formulations des propergols composites utilisés dans les missiles en service actuellement (c'est-à-dire les butalanesTM mélangeant perchlorate d'ammonium, aluminium et liant à polybutadiène), par exemple par l'augmentation du chargement solide – c'est-à-dire de la quantité de particules solides par rapport à la quantité de liant – vont dans la même direction, avec à la clef des gains de performances parfois élevés¹⁷.
- ➔ Comme nous l'avons vu, les propergols solides peuvent être stockés dans l'engin pendant de nombreuses années sans requérir de maintenance particulière. Par ailleurs, ils présentent moins de risque et moins de danger que les ergols liquides ou les solutions cryotechniques qui s'avèrent corrosifs et/ou toxiques (e.g ; acide nitrique, hydrazine) ou qui ne peuvent être stockés pendant des durées dépassant, au mieux, quelques jours (e.g. oxygène ou hydrogène liquide). Du fait de ce caractère stable et sécurisant, les propergols solides s'avèrent être l'option généralement privilégiée par les pays disposant de missiles lancés depuis des sous-marins¹⁸. L'Union Soviétique a longtemps développé et déployé sur ses sous-marins lanceurs d'engins à la fois des missiles à propulsion liquide (ergols stockables) en parallèle de systèmes à propergols solides. Ces derniers plus faciles à mettre en œuvre – le lancement des premiers nécessitant de remplir le tube d'eau – offraient en effet des

¹⁴ http://www.dtsc.ca.gov/LawsRegsPolicies/Regs/upload/HWMP_WS_dPerch-Sec5.pdf

¹⁵ A. Davenas, « Technologie des propergols solides », Éditions Masson, 1989, pp. 19-20.

¹⁶ NitramitesTM, NitralanesTM et OxalanesTM.

¹⁷ Voir par exemple la différence entre les performances du M-45 et du M-51.

¹⁸ *Submarine Launched Ballistic Missile (SLBM)* pour la terminaison américaine.

performances en portée généralement inférieures¹⁹. Toutefois, tant côté américain que français – y compris d'ailleurs pour des systèmes balistiques terrestres (avec le système *Minuteman* pour les États-Unis et S-2 pour la France) – le choix pour ce type d'engin s'est immédiatement porté sur des propergols solides.

- ➔ La principale limitation liée à l'utilisation des propergols solides tient au fait que, une fois la combustion débutée, elle se poursuit jusqu'à ce que le chargement soit entièrement brûlé. Même s'il existe des techniques permettant l'arrêt de la poussée, elles s'avèrent complexes à concevoir et à mettre en place. La conception et la réalisation de chargements ayant des formes internes complexes permettant d'obtenir des densités de chargement élevées et des lois de poussées conformes aux besoins opérationnels nécessitent des savoir-faire importants.
- ➔ En termes économiques, du fait de la complexité de leur conception et de leur réalisation, les systèmes à propulsion liquide sont généralement considérés comme plus onéreux à développer et à fabriquer, en particulier pour l'obtention de systèmes de longue portée dans la mesure où certains composants clefs s'avèrent particulièrement délicats à produire (turbopompe, injecteur, chambre de combustion...). Cependant, l'expertise (ou le savoir-faire) nécessaire à la mise au point industrielle des chargements en propergol solide – en particulier pour ceux ayant les dimensions les plus importantes, des formes internes complexes ou encore des impulsions spécifiques élevées –, ainsi que les difficultés liées à l'accès aux matières premières, compensent en partie le différentiel économique qui peut exister entre les deux modes de propulsion. Ainsi, il faut souligner que l'accumulation des savoir-faire nécessaires pour réaliser des propergols composites ayant des applications à caractère stratégique – du fait de la portée, de la masse de la charge utile emportée ou du niveau d'accélération initiale requis – requiert des investissements élevés maintenus pendant des durées longues (plusieurs décennies). A l'inverse, la mise au point de blocs ayant des formes internes simples et de faibles dimensions ne demande pas une maîtrise aussi importante mais les performances obtenues sont largement moindres et la sûreté de fonctionnement plus aléatoire.

En synthèse, même si la maîtrise de la conception et de la fabrication des chargements en propergol solide exige un savoir-faire pointu, la propulsion solide constitue aujourd'hui une solution unique et efficace pour obtenir à coût économique maîtrisé des systèmes ayant des applications opérationnelles exigeantes et spécifiques. Du fait de leur facilité de stockage et d'utilisation, les moteurs reposant sur ce principe sont particulièrement intéressants pour l'équipement des missiles tirés de sous-marins. Avec le développement de nouveaux composés chimiques, leurs performances énergétiques les placent à égalité avec les moteurs à propulsion liquide dont le développement et la mise au point demeurent particulièrement complexes et coûteux. En outre, ils sont particulièrement adaptés pour assurer les accélérations très élevées critiques pour certaines applications (défense aérienne ou antimissiles).

Toutefois, peu de pays détiennent aujourd'hui le savoir-faire et l'infrastructure industrielle nécessaires pour développer une capacité dans le domaine de la propulsion solide de grande dimension. En la matière, il paraît utile de conduire deux comparaisons, la première entre les États possédant une expérience relativement longue dans le domaine

¹⁹ Pavel Podvig, « Russian Strategic Nuclear Forces », The Center for Arms Control, Energy and Environmental Studies, 2001, pp. 331-335.

des propergols composites (États-Unis, France, Russie, Chine, (Israël dans une moindre mesure) – Japon et Italie pour la partie applications spatiales) et la seconde entre ces pays et ceux qui ont engagé plus récemment des programmes de développement (Inde, Iran, Pakistan).

	MISSILES BASÉ À TERRE – EN SILO (ICBM)	MISSILES MOBILES SUR VÉHICULES TERRESTRES (ICBM)	MISSILES LANCÉS DE SOUS-MARINS (SLBM)	REMARQUES
<i>États-Unis</i>	Liquide Solide	Solide	Solide	Filière liquide abandonnée pour les applications stratégiques (retrait du service en 1982 des TITAN)
<i>France</i>	Solide	--	Solide	Plus de missiles terrestres
<i>Union-Soviétique/ Russie</i>	Liquide Solide	Solide	Liquide Solide	Une partie des missiles russes encore en service emploient des ergols liquides
<i>Chine</i>	Liquide	Solide	Solide	Remplacement progressif des missiles stratégiques à propulsion liquide

**TABLEAU 1 : PRINCIPALES FILIÈRES DE PROPULSION
 POUR LES MISSILES STRATÉGIQUES INTERCONTINENTAUX**

1.2 – Développements nationaux en matière de propulsion solide

1.2.1 – Les grandes puissances balistiques



Figure 5 : Le premier missile américain à propulsion solide composite entre en service en 1962 (Polaris A-1)

L'évolution de la technologie des propergols solides, depuis les composés double base jusqu'aux composites utilisant des molécules énergétiques (par exemple de l'hexogène), tient historiquement aux efforts de certains États pour le développement de missiles stratégiques après la seconde guerre mondiale. Aux États-Unis, cette filière technologique s'est matérialisée à travers les choix de la propulsion solide pour la composante océanique (avec le missile Polaris) et pour la composante terrestre (Minuteman)²⁰, les savoir-faire développés à cette occasion étant ensuite utilisés pour les lanceurs spatiaux dont la navette spatiale. Ce choix semble devoir beaucoup aux investissements de recherche effectués dans les années 1940-1950, au sein de la société Aerojet, sur l'utilisation de l'aluminium et du perchlorate d'ammonium pour accroître l'impulsion spécifique des propergols, puis par les travaux au sein de Thiokol et du *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), sur l'utilisation de matrices polymères en tant que liant²¹.

²⁰ J. D. Hunley, « The History of Solid-Propellant Rocketry: What we Do and Do not Know », American Institute of Aeronautics and Astronautics, June 1999, p. 3.

²¹ Ibid, pp. 6-7.

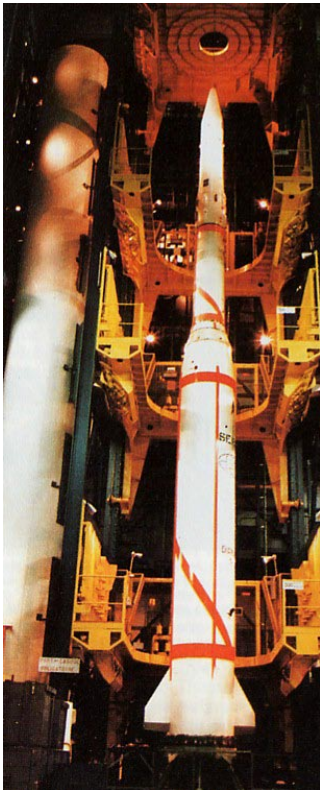


Figure 6 : Le deuxième étage du lanceur diamant est constitué du système à propergol composite Topaze

En France, les efforts engagés en 1959 pour la mise au point de la force de dissuasion stratégique ont permis de poursuivre les études conduites précédemment sur l'autopropulsion et les propergols homogènes puis sur la propulsion composite²². Les travaux menés par la Société pour l'Etude et la Réalisation d'Engins Balistiques (SEREB) – maître d'ouvrage – consistent notamment à faire mettre au point par la Société pour l'Etude de la Propulsion par Réaction (SEPR) un engin piloté à propulsion solide, le Topaze, qui serait amené à constituer un deuxième étage propulsif pour le premier missile français Saphir²³. Les premiers essais de Topaze interviennent en 1962. Cet engin emploie pour la première fois un propergol composite utilisant un liant à base de polyuréthane dit IsolaneTM, de 80 cm de diamètre utilisant 1 500 kg de propergol dont l'impulsion spécifique dans le vide est de l'ordre de 259 secondes. Si la structure du propulseur est en acier à haute résistance, les tuyères en matériaux bobinés sont déjà pilotées par un système hydraulique. Des efforts réalisés sur la série des « Pierres Précieuses » seront dérivés à la fois les programmes spatiaux (Diamant) et les programmes de missiles lancés de sous-marins (Mer-Sol Balistique Stratégique-MSBS) et depuis la terre (Sol-Sol Balistique Stratégique-SSBS). Il est intéressant de noter que très rapidement, les programmes spatiaux (lanceur Diamant) et de missiles balistiques sont associés, à la différence des États-Unis pour lesquels le choix dans les années 1960 de la propulsion liquide dans le domaine spatial et solide dans le domaine stratégique conduit d'abord à une séparation des deux projets. On peut penser que la France a développé un modèle original en utilisant dès les premiers développements les synergies entre les applications spatiales et stratégiques.

Ainsi, la France et les États-Unis s'avèrent être au début des années 1960 les seuls États nucléaires à avoir développé les technologies de propulsion solide composite destinées à leurs forces stratégiques. Côté soviétique, le premier missile à propergol solide, le SS-13, n'entre en service opérationnel qu'à la fin des années 1960²⁴. Par ailleurs, les premiers travaux de développements de propergols solides pour la force terrestre soviétique, engagés à la fin des années 1950, semblent avoir donné des résultats mitigés, avec des systèmes ayant de piètres performances en portée et en capacité d'emport²⁵. Selon toute vraisemblance, ces problèmes viennent de l'utilisation de propergols homogènes ne permettant pas le décollage de missiles ayant des masses élevées²⁶.

²² SNPE, « A propos des matériaux énergétiques » [www.materiaux-energetiques.com/publications/docs/Guide.pdf]

²³ http://www.sat-net.com/serra/sereb_f.htm

²⁴ Pavel Podvig, « Russian Strategic Nuclear Forces », op. cit., pp. 205-206.

²⁵ Alexey Lipanov, « Historical Survey of Solid-Propellant Rocket Development in Russia », *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, N° 6, November-December 2003, p. 1073.

²⁶ Les premiers moteurs étaient sans doute réalisés par la mise en fagot de plusieurs chargements de propergol double base.



Figure 7 : Le missile français M-51 a fait l'objet de son premier essai en vol en 2007

Figure 8 : Le trident II D5 américain lors d'un essai depuis la mer

Des travaux de recherche sont engagés à cette époque au sein de l'institut d'ingénierie thermique de Moscou, pour la mise au point de propergols composites à base de perchlorate d'ammonium utilisant un liant polyuréthane et un système de déviation de jet par réinjection pour le pilotage. La mise au point de cette composition permet le développement du SS-13²⁷. Toutefois, les efforts engagés pour le développement de propergols composites ne porteront leurs fruits pour la composante océanique que plus tardivement. Ainsi, le SS-N-17, premier missile lancé de sous-marin à propergol solide, n'entre en service qu'en 1980 avec une portée d'environ 3 900 km pour une charge emportée de 450 kg²⁸. Ce n'est qu'avec le SS-N-20, qui entre en service en 1984, que l'Union Soviétique installe sur les sous-marins de la classe Typhoon un système intercontinental à propergol composite. En revanche, l'utilisation de missiles à propulsion solide pour la composante terrestre trouve plus de succès avec la mise au point d'engins mobiles sur route (SS-20 et SS-25) ou sur rail (SS-24) dont les mises en service date des années 1980. Depuis le début des années 2000, les Russes développent deux missiles terrestres, le RS-24 et le Topol-M (SS-27 dans la dénomination OTAN), le premier ayant fait l'objet d'un test réussi le 29 mai 2007. S'agissant de la composante navale, le



Figure 9 : Les systèmes soviétiques lancés de sous-marins. Le SS-N-20 premier engin intercontinental à propulsion solide n'est déployé qu'en 1984. (source FAS)

²⁷ Ibid, p. 1074.

²⁸ Pavel Podvig, « Russian Strategic Nuclear Forces », op. cit., p. 329.

développement d'un nouveau missile lancé de sous-marin et destiné à remplacer le SS-N-20 a débuté dans les années 1990. Ce système, le SS-NX-30 Bulava (le SS-27 en est la version terrestre), d'une portée annoncée de 10 000 km, qui équipera les futurs sous-marins russes de classe Borey, a toutefois connu une période de développement difficile, marqué par plusieurs échecs lors des premiers essais en vol conduits en 2006, jetant un doute sur sa mise en service effective avant la fin de la décennie 2000²⁹.

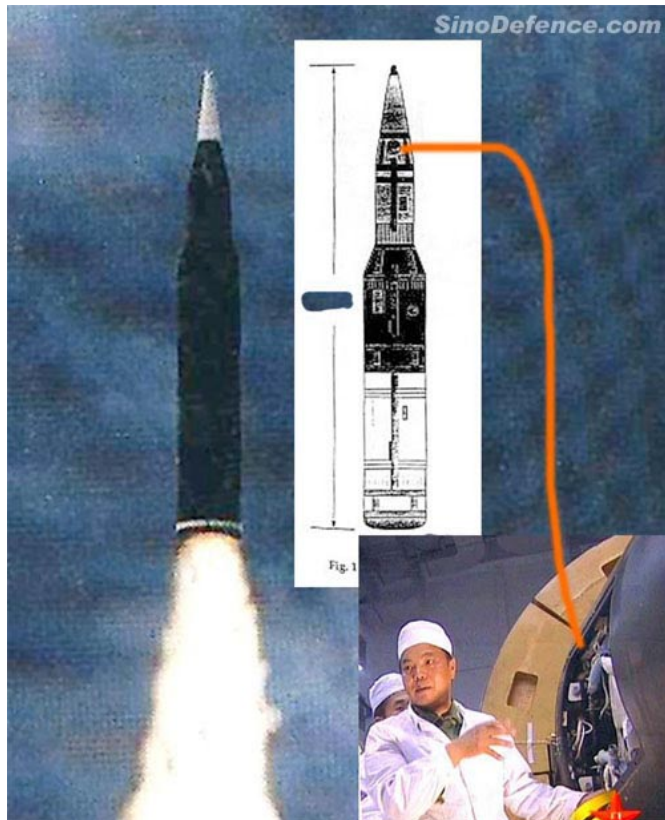


Figure 10 : Le DF-31, premier missile stratégique chinois à propulsion solide, n'effectue son premier essai en vol qu'en 1992 (source sinodefense.com)

destiné à être lancé depuis une plate-forme terrestre mobile ou un sous-marin (DF-31/JL-2) n'aboutit aux premiers essais en vol qu'à partir de 1992. Après deux tentatives qui conduisent à l'explosion du premier étage propulsif³², le programme d'essais est suspendu pour ne reprendre qu'en 1995, à la fois dans une configuration terrestre et lancée depuis une plate-forme immergée, et se poursuit jusqu'en 1999, suggérant que la mise au point du système s'est avérée difficile. Du reste, si le DF-31 semble être entré en service en 2006³³, le JL-2 n'aurait quant à lui pas été déployé malgré la mise en service en 2007 du premier sous-marin de la classe Jin type 094 destiné à son lancement³⁴.

Pour ce qui concerne la République Populaire de Chine, les efforts dans le domaine des propergols solides semblent avoir débuté dans les années 1970 à la fois pour la mise au point de missiles tactiques (DF-11 et DF-15) et dans le cadre de la modernisation des capacités stratégiques du pays. Il s'agit alors de rendre mobile celles-ci, à la fois en renforçant les moyens terrestres et en mettant au point une composante océanique³⁰. Pourtant ce n'est qu'à la fin des années 1980 que les premiers missiles tactiques mobiles (de portée 300 km et 600 km) sont déployés au sein des forces stratégiques chinoises (la seconde artillerie). En revanche, le premier essai d'un missile à caractère stratégique, le DF-21 qui existe en version navale sous la dénomination JL-1, n'intervient qu'en 1985. Cet engin possédant deux étages propulsifs aurait une portée de 2 000 km environ pour une charge utile emportée situé autour de 600 kg³¹. La mise au point, engagée à la même période, d'un système d'une portée de 8 000 km des-

²⁹ « Test launch of Bulava missile fails third time this year – paper », By RIA Novosti, December 28th, 2006.

³⁰ <http://www.sinodefence.com/strategic/missile/df11.asp>

³¹ <http://www.sinodefence.com/strategic/missile/df21.asp>

³² <http://www.fas.org/nuke/guide/china/icbm/df-31.htm>

³³ « China deploys new Dongfeng Missile », United Press International, 14 juin 2006.

³⁴ http://www.fas.org/blog/ssp/2007/07/new_chinese_ballistic_missile.php

Au regard de ces éléments, il s'avère donc possible de différencier les grandes puissances balistiques selon le degré de sophistication de leur maîtrise des propergols solides composites qui reflète les investissements consentis dans ce domaine tout autant que les applications pratiques qui ont pu être réalisées du fait des savoir-faire et de l'expérience acquis.

Les États-Unis apparaissent aujourd'hui comme le pays ayant l'avance la plus importante dans le domaine, à la fois pour la réalisation de systèmes mais également en termes de recherche. En effet, depuis la mise au point des premières compositions utilisant des liants plastiques ; des types Isolane™ dans les années 1950 puis Butalane™ dans les années 1960 avant l'utilisation de Nitralane™ pour les Trident II-D5 ; les laboratoires américains ont poursuivi le développement de nouveaux composés, en particulier dans le domaine des liants avec l'utilisation de polymères énergétiques (polyazoture de glycidyle ou PAG), dans celui des charges oxydantes avec l'utilisation de matériaux très énergétiques (hexanitro-hexaza-isowurtzitane ou CL20). Les travaux aux États-Unis visent à la fois à améliorer les performances énergétiques des propergols mais également à en accroître la sécurité d'emploi tout en diminuant l'impact de l'utilisation sur l'environnement³⁵. L'ensemble de ces efforts vise à la fois à l'amélioration des capacités des engins stratégiques américains mais également le marché des lanceurs spatiaux. Ainsi, les trois étages du Trident II-D5 utilisent un propergol solide principalement à base d'octogène-HMX³⁶.

Dans le domaine des matériaux énergétiques, la France détient aussi un savoir-faire et une connaissance scientifique très avancée du fait des développements conduits par le Service des Poudres puis par la Société Nationale des Poudres et Explosifs (SNPE) depuis les années 1950. La SNPE a non seulement travaillé sur les propergols composites en utilisation opérationnelle mais également sur la plupart des composants des nouveaux matériaux (PAG, Butacène™³⁷, ADN et CL-20). La société possède au reste une capacité de production en la matière³⁸. Elle détient en outre la compétence industrielle qui lui permet à la fois de réaliser des chargements pour la propulsion stratégique et de concevoir ceux destinés à des applications spatiales³⁹. Cette compétence de la SNPE est également adossée à une expérience qui lui a permis de se doter des outils d'essai et de simulation qui facilitent le développement à moindre coût de nouveaux systèmes.

De fait, le niveau de maîtrise russe paraît moindre que ceux des États-Unis ou de la France. *A priori*, ce retard s'explique par la poursuite d'une filière liquide pour les engins stratégiques, y compris de la composante océanique, mais également pour ses lanceurs spatiaux, décision qui s'est traduite par un faible niveau d'investissement dans le domaine de la propulsion solide⁴⁰. Pour autant, la Russie possède la capacité de concevoir et de produire des propergols composites de type Butalane™. Par ailleurs, il

³⁵ Le perchlorate d'ammonium dégage du chlorure d'hydrogène durant sa combustion, qui peut se recomposer avec la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère pour donner de l'acide chlorhydrique.

³⁶ <http://www.fas.org/nuke/guide/usa/slbn/d-5.htm>

³⁷ Liant pour propergol à haute vitesse de combustion et moteur à forte accélération.

³⁸ M. B. Talawar et al, « Emerging Trends in Advanced High Energy Materials », *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 43, N° 1, 2007, pp. 62-72.

³⁹ Contrairement, par exemple, à l'Italie dont la compétence est limitée au seul domaine des applications spatiales et tactiques.

⁴⁰ <http://www.astronautix.com/articles/comblants.htm>

semble que les instituts russes ont conduit dans les années 1970-1980 des recherches sur des nouveaux oxydants destinés à remplacer le perchlorate d'ammonium. Ainsi, l'institut de chimie organique Zelinsky a synthétisé du dinitramide d'ammonium (ou ADN) qui aurait ensuite été utilisé, semble-t-il en pourcentage cependant limité, pour la propulsion de certains systèmes en remplacement du perchlorate d'ammonium comme, par exemple, le missile intercontinental mobile SS-25-Topol⁴¹.

A ce jour, la Chine s'avère sans doute la puissance balistique la moins avancée dans le domaine des propergols solides composites. Son expérience en la matière est relativement récente et l'essentiel de ses capacités stratégiques opérationnelles est constitué par des missiles à propulsion liquide dont le développement a été permis par les transferts obtenus de la Russie dans les années 1950-1960. Grâce aux développements lancés dans les années 1980 et destinés à accroître la mobilité et la capacité de seconde frappe de ses moyens nucléaires, la Chine semble être en mesure de concevoir et de développer des étages propulsifs de grand diamètre destinés à ses nouveaux missiles (DF-31 et DF-41).

Du côté occidental, plusieurs grands industriels possèdent la compétence nécessaire pour l'élaboration de moteurs à propergol solide :

Aux États-Unis, ATK et Aerojet se partagent les marchés de défense et ceux du lancement spatial. ATK conçoit et fabrique la plupart des moteurs des missiles stratégiques et lanceurs américains, et ceux des intercepteurs exoatmosphériques (*Ground Based Interceptor* et *Kinetic Energy Interceptor*). Pour sa part, Aerojet développe les systèmes de propulsion des principaux intercepteurs endoatmosphériques (*Patriot* ou *Standard Missile-SM*) mais également des dispositifs de propulsion annexe pour les missiles stratégiques. Ces deux sociétés sont autant des « propergolistes » que des motoristes. Cela se traduit par le fait qu'elles réalisent et intègrent l'ensemble des moteurs : chargement, structure et tuyère. Il convient de noter que la production du perchlorate d'ammonium est assurée par une troisième société : AMPAC, cette dernière ayant fusionné avec PEPCON en 1982 puis absorbé l'activité de Kerr-McGee en 1997⁴².

En France, il existe une répartition des activités entre propergoliste et motoriste dans le domaine des missiles stratégiques. L'unique propergoliste européen ayant une compétence de plusieurs décennies dans le domaine des moteurs de fort diamètre est la SNPE, qui produit également du perchlorate d'ammonium sur son site de Toulouse. Tuyères, protections thermiques internes et structures des moteurs sont produites par SNECMA Propulsion Solide (SPS), partenaire de la SNPE au sein du consortium G2P pour les missiles stratégiques, et par EADS-Astrium.

Par ailleurs, dans le secteur spatial, à travers sa filiale REGULUS, la SNPE participe au fonctionnement de l'usine de propergol de Guyane qui fabrique les MPS d'Ariane 5⁴³.

⁴¹ M. B. Talawar et al, « Emerging Trends in Advanced High Energy Materials », op. cit., p. 63.

⁴² http://www.dtsc.ca.gov/LawsRegsPolicies/Regs/upload/HWMP_WS_dPerch-Sec5.pdf

⁴³ <http://www.sme-propulsion.com/fr/spatiales/index.html>

1.2.2 – Les autres puissances spatiales ou balistiques (Italie, Japon et Israël)

Bien qu'ils ne possèdent pas de programmes de missiles balistiques à caractère stratégique, deux États ont développé des compétences dans le domaine des chargements à propergol solide suffisantes pour leur permettre de réaliser des lanceurs spatiaux ; un troisième, Israël, a développé ces compétences à usages spatial, balistique et de défense antimissile.

Le programme italien a débuté dans les années 1960 dans le cadre d'une coopération avec la NASA sur le lanceur SCOUT, conduisant à une série de lancements de satellites depuis le centre spatial de San Marco entre 1967 et 1988⁴⁴. Cette coopération a sans doute permis à l'Italie de commencer à développer des savoir-faire propre dans le domaine des chargements à propergol solide composite. En 1988, le gouvernement crée l'Agence Spatiale Italienne (ASI, *Agenzie Spaziale Italiana*) mais l'existence d'une compétition entre deux projets, le premier reposant sur un successeur du SCOUT, le second sur la mise au point d'un nouveau moteur (Zefiro), ralentit les progrès des projets italiens. En 1993, la modernisation du SCOUT est finalement abandonnée pour la mise au point d'un lanceur spatial à trois étages basé sur les technologies acquises dans le cadre du programme Zefiro. Le VEGA, qui doit permettre la mise sur orbite basse de charge de 300 à 2 000 kg, possède notamment un premier étage propulsif, le P80, à base de ButalaneTM de 80 tonnes et de 3 mètres de diamètre, réalisé à Kourou, dans la filiale commune Regulus d'Avio et de SNPE⁴⁵ pour le chargement de propergol solide. La réalisation de cet étage reçoit à partir de 1998 un financement européen et fait l'objet de coopérations entre la France et l'Italie. En 2003, l'ASI obtient un nouveau contrat pour la réalisation du lanceur VEGA, basé sur le P80. Grâce à ces financements et au caractère européen du programme, l'ASI a pu poursuivre le développement des compétences italiennes dans le domaine de la formulation et de la réalisation de chargements à propergol solide de grande taille. A noter qu'entre temps, Avio s'est imposé comme partenaire à part entière dans la réalisation des MPS d'Ariane 5 (J.V. Europropulsion et Regulus)

Engagé en 1955 – le Japon faisant jusqu'à cette date l'objet d'une interdiction de développement de fusée – le programme spatial japonais débute par des études sur les fusées sondes menées d'abord par l'Université de Tokyo (qui devient l'*Institute for Space and Astronautical Science* en 1981⁴⁶). Mais ce n'est qu'à partir de 1969, dans le cadre d'un accord avec les États-Unis, que les efforts débutent réellement avec la mise au point du N-1 (lanceur Delta américain produit sous licence) mais surtout des transferts importants de technologies des entreprises américaines vers l'agence spatiale japonaise (NASDA) nouvellement créée. En particulier, celle-ci bénéficie de l'apport de la société américaine Thiokol sur les moteurs à propergol solide du troisième étage du N-2, dont le premier lancement date de 1981. En parallèle des travaux sur les étages cryogéniques destinés aux premiers lanceurs spatiaux nationaux (H-1 et H-2), Tokyo développe dès les années 1970 une série de fusées à chargements de propergol solide (M4S, M3 puis M5) dont la nature duale soulève quelques interrogations⁴⁷. En particulier, le M5 dont la conception est lancée en 1989 serait capable de portée intercontinentale

⁴⁴ <http://www.fas.org/spp/guide/italy/agency/index.html>

⁴⁵ <http://esamultimedia.esa.int/docs/VEGABrochure.pdf>

⁴⁶ Steven Berner, « Japan's Space Program: a fork in the road », RAND, 2005, p. 3.

⁴⁷ <http://www.fas.org/nuke/guide/japan/missile/index.html>

s'il était employé dans une configuration sol-sol. En tout état de cause, l'expérience acquise dans le domaine spatial grâce aux transferts massifs de technologies américaines a vraisemblablement permis au Japon de maîtriser la formulation et la réalisation de chargements de propergol solide de grande dimension.



Figure 11 : Le lanceur spatial israélien Shavit utilise les deux premiers étages du missile stratégique Jericho-II

Israël possède également un programme de missiles balistiques et de lanceurs spatiaux qui paraissent s'alimenter mutuellement. Ainsi, le lanceur spatial Shavit aurait bénéficié des technologies développées pour les deux premiers étages des missiles balistiques Jericho II et Jericho III. Cette famille d'engins stratégiques israéliens, qui compte deux systèmes déployés et un en cours d'essai (Jericho III d'une portée présumée de 4 000 km⁴⁸), tient son nom du premier système conçu et livré à Israël par la société Dassault dans les années 1960-1970 et dont la production aurait été engagée par Tel Aviv à la fin des années 1970⁴⁹. Depuis, en particulier avec les développements de la famille Shavit et des Jericho-II et III par *Israeli Aircraft Industry* (IAI), Israël a acquis un bon degré d'autonomie pour la conception et la production de l'ensemble des composants clés, en particulier pour ce qui concerne les chargements à propergols solides composites⁵⁰. Ainsi, le premier étage du Jericho-II, d'un diamètre d'environ 1,50 m, fournirait une impulsion spécifique de 250 secondes, et le second de 278 secondes dans le vide⁵¹. Le récent essai du nouveau Jericho III, dont la portée aurait été considérablement augmentée par rapport à son prédécesseur (de 1 500 km à 4 000 km)

par l'ajout d'un étage propulsif, ainsi que la mise au point du Shavit-3 semblent démontrer qu'Israël continue à progresser sur la conception de chargements à propergols solides composites. Par ailleurs, les travaux menés pour le développement de l'intercepteur antimissiles Arrow-2 (ATK étant en charge de la partie propulsive dans le cadre d'un accord entre IAI et Boeing⁵²) sont susceptibles de favoriser des transferts de compétences entre les États-Unis et Israël dans le domaine des propergols solides composites.

⁴⁸ Ce missile aurait été testé en vol en janvier 2008 et comprendrait trois étages propulsifs dont deux utilisant des chargements solides. http://www.martinfrost.ws/htmlfiles/jan2008/israeli_missile.html

⁴⁹ http://nti.org/e_research/profiles/Israel/Missile/index_3563.html

⁵⁰ En revanche, on peut s'interroger sur l'accès aux matières premières critiques, le perchlorate d'ammonium, par exemple, provenant très majoritairement des États-Unis.

⁵¹ Si l'on suppose que les deux étages correspondent à ceux du Shavit-2. Voir <http://www.israeli-weapons.com/weapons/space/shavit/Shavit.html>

⁵² <http://www.army-technology.com/projects/arrow2/>

1.2.3 – Les nouveaux entrants

Plusieurs pays ont engagé, plus ou moins récemment, des programmes destinés à produire des propergols composites.

Ainsi, l'Inde s'appuie sur des développements conduits dans le domaine spatial pour lancer en 1983 le projet *Integrated Guided Missile Program* (IGMDP) qui capitalise sur les technologies mises au point par l'*Indian Space Research Organisation* (ISRO) dans le cadre du programme de lanceur SLV pour développer un démonstrateur de missile dont la portée doit atteindre 1 500 km pour 1 000 kg de charge utile (Agni). En la matière, l'Inde aurait profité de l'accès à des données techniques détaillées de la NASA sur le lanceur léger Scout ainsi que de la formation de ses premiers ingénieurs par l'agence américaine à la fin des années 1960⁵³.

Lancé au début des années 1970, le développement du SLV-3 vise à mettre au point un lanceur à 4 étages propulsifs solides permettant de mettre une charge de 40 kg en orbite. Chaque étage propulsif est équipé d'un chargement de propergol composite de type aluminium/perchlorate/polybutadiène acrylonitrile (PBAN, polymère du liant du propergol des MPS de la navette spatiale américaine) alors que la structure est initialement en acier⁵⁴. Après un échec du premier lancement d'un satellite par cet engin en 1979, du fait d'une défaillance du deuxième étage, trois mises en orbite sont réussies en 1980, 1981 et 1983. Pour la dernière mission, la structure en acier aurait été remplacée par un composite filamentaire permettant une augmentation de l'impulsion de chaque étage.



Figure 12 : Le lanceur SLV-3 indien utilise 4 étages à propergols composites (source ISRO)

Le succès du programme SLV permet à l'Inde de conduire le développement du démonstrateur Agni utilisant pour son premier étage un propergol composite, du même type que celui du SLV⁵⁵, d'un diamètre d'un mètre ainsi qu'une structure et une tuyère en acier, cette dernière étant équipée d'une protection thermique en graphite. Après une série d'essais en vol, débutée en 1989 et achevée en 1995, les services indiens entreprennent dès 1998 le développement d'une version opérationnelle du missile, l'AGNI-II, destinée à l'emport d'une arme nucléaire. Selon les données disponibles, le PBAN est remplacé par du polybutadiène hydroxytéléchélique (PBHT), mais le diamètre de l'engin reste identique ainsi que les matériaux utilisés pour la structure et la tuyère, même si le deuxième étage, initialement à ergols liquides, est remplacé par un

⁵³ Richard Speier, « US Satellite Space Launch Cooperation and India's Intercontinental Ballistic Missiles Program », in *Gauging US-India Strategic Cooperation*, edited by H. Sokolski, March 2007, p. 193. Voir également, [http://www.wisconsinproject.org/pubs/speeches/2000/GM %20Hawaii %20speech.htm](http://www.wisconsinproject.org/pubs/speeches/2000/GM%20Hawaii%20speech.htm)

⁵⁴ <http://www.bharat-rakshak.com/SPACE/space-launchers-slv.html#SLV>

⁵⁵ <http://www.bharat-rakshak.com/MISSILES/Agni.html>

moteur à propergol composite⁵⁶. Ce missile, dont le premier essai date de 1999, aurait une portée de 2 500 km et serait capable d'emporter une charge utile d'environ 1 000 kg. Ces succès ouvrent la voie à la mise au point d'un nouvel engin, l'AGNI-III, dont la portée serait amenée à 4 000 km et la masse emportable à 1,5 tonne. Cet engin, dont les dimensions sont largement supérieures à celles de ses prédécesseurs⁵⁷, subit un premier essai en vol le 9 juillet 2006 qui se solde par un échec. La DRDO obtient toutefois un succès lors du second essai le 12 avril 2007⁵⁸. Les modifications apportées à la partie propulsive semblent principalement concerner l'augmentation du diamètre des deux étages propulsifs à 2 mètres et la mise au point d'une structure composite pour le premier étage⁵⁹. Elles permettraient au missile d'atteindre une portée de 5 000 km pour une charge utile de 1 500 kg.

L'Inde apparaît donc comme ayant un niveau de maîtrise des technologies de propergol composite globalement équivalent à celui de la Chine. Dehli n'a officiellement engagé aucun développement pour la mise au point de missiles balistiques lancés de sous-marin mais a tout de même procédé récemment à un premier essai de tir à partir d'un caisson immergé. De la même façon, la production indienne de propergols semble encore dépendre de l'obtention de matières premières auprès de fournisseurs étrangers. Ce serait notamment le cas pour le perchlorate d'ammonium, même s'il existe une société en Inde fabriquant des sels de perchlorate. En revanche, il apparaît que, du fait des restrictions mises en place par le régime de contrôle des technologies de missiles (MTCR) à partir de 1987, l'Inde a développé une capacité plus autonome de production de certains éléments clefs. En particulier, afin de remplacer la source américaine fournissant le PBAN, une capacité locale de fabrication de polybutadiène (PBHT) aurait été mise en place⁶⁰.

Au Pakistan, à l'inverse du programme indien de propergols solides, l'origine technique des développements apparaît difficile à établir. Toutefois, les efforts nationaux auraient été engagés à partir du début des années 1980 sous la conduite de la *Space and Upper Atmosphere Research Commission* (SUPARCO). Sur la base de technologies de fusées météorologiques, la SUPARCO parvient à développer un engin de courte portée (80 km), le HATF-1, capable d'emporter une charge d'environ 500 kg. Selon toute vraisemblance, il s'agirait d'une roquette montée sur un véhicule lanceur assez rustique⁶¹, utilisant vraisemblablement un propergol composite rustique (et de faible diamètre) en guise de propulsion⁶². Si le développement de systèmes de plus longue portée est décidé au milieu des années 1980, c'est à partir de 1987 que le Pakistan obtient la livraison depuis la Chine de missiles tactiques utilisant un propergol composite. Dans le cadre de la coopération entre les deux pays, il est vraisemblable que des transferts de compétence, de moyens de fabrication et de composés chimiques intervenant dans la fabrication de

⁵⁶ http://www.nti.org/e_research/profiles/India/Missile/index.html Une version mobile mono-étage du missile subit également plusieurs essais en vol à partir de 2000.

⁵⁷ Sa masse au décollage est plus du double de celle de l'AGNI-II. <http://www.bharat-rakshak.com/MISSILES/Agni.html>

⁵⁸ « India successfully tests missile able to hit China », *Defense News*, April 13th, 2007.

⁵⁹ <http://www.bharat-rakshak.com/MISSILES/Agni.html>

⁶⁰ <http://www.pakdef.info/forum/archive/index.php/t-1034.html>

⁶¹ http://204.71.60.37/e_research/profiles/Pakistan/Missile/index.html

⁶² Entretien de l'auteur, février 2008.

propergols composites, notamment du perchlorate d'ammonium, aient eu lieu⁶³. Quoi qu'il en soit, le Pakistan procède en 1999 au premier tir d'un missile monoétage à propulsion solide d'une portée de 500-600 km, le Shaheen-I. Un engin bi-étage de 2 000 km de portée, le Shaheen-II, fait à son tour l'objet d'un premier essai en vol le 9 mars 2004⁶⁴.



Figure 13 : Le Shaheen-II pakistanais serait un missile bi-étage à propergols composites d'une portée de 2 000 km

Il s'avère extrêmement difficile, sur la base d'éléments relativement épars, de conclure sur le niveau de maîtrise réel du Pakistan en matière de propulsion solide composite. De fait, la question centrale est de savoir si les développements sont le résultat d'un programme national ou d'acquisitions sur étagère de technologies chinoises. Quoi qu'il en soit, le Pakistan semble capable de produire par lui-même des propergols composites à base de perchlorate d'ammonium. En effet, plusieurs cargaisons de ce composé ont été interceptées à la fin des années 1990 à

destination de SUPARCO. En revanche, il apparaît peu probable que ce pays soit capable de concevoir et de fabriquer des moteurs de grand diamètre ou encore des composés très performants.

Dernier entrant dans le domaine des propergols solides, l'Iran aurait débuté la mise au point de roquettes et de missiles de courte portée à la fin du conflit contre l'Irak. Ainsi, Téhéran développe une copie locale du Frog soviétique, le Zelzal, un engin d'une portée d'une centaine de kilomètres. Cette grosse roquette possède vraisemblablement un moteur à propergol composite de diamètre limité fabriqué sur le site de Parchin⁶⁵. Des travaux sur des propergols composites pourraient avoir été lancés dans les années 1990, considérés comme bénéficiant du soutien de la Chine voire du Pakistan, mais, dans ce domaine, tout porte à croire qu'ils se limitent à la propulsion des engins tactiques⁶⁶. Pour autant, s'il ne semble pas que Téhéran soit parvenu à concevoir ou à réaliser des chargements de diamètre important, des informations non recoupées font état de l'existence de transferts de missiles Shaheen pakistanais vers l'Iran⁶⁷. Ce pays apparaît, à la lumière des informations actuelles, comme disposant d'une bonne maîtrise des processus de fabrication de propergols solides destinés à des systèmes de courte portée, grâce notamment à l'expérience industrielle acquise dans le cadre de la production de moteurs de roquettes sur le site de Parchin. En revanche, le passage vers des composites pour la propulsion de missiles de plus longue portée ne paraît pas à ce stade avoir eu lieu. Ceci peut s'expliquer par l'absence de transferts de technologies depuis la Chine – du fait de la pression des États-Unis – qui auraient été suffisants pour accélérer les développements. A ce titre, le cas iranien souligne toutes les difficultés qui sont liées au passage entre

⁶³ http://www.nti.org/e_research/profiles/Pakistan/Missile/3297.html

⁶⁴ <http://www.fas.org/nuke/guide/pakistan/missile/shaheen-2.htm>

⁶⁵ http://www.nti.org/e_research/profiles/Iran/Missile/3876_4087.html

⁶⁶ Bill Gertz, « China assists Iran, Libya on Missiles », *The Washington Times*, June 16, 1998.

⁶⁷ <http://www.fas.org/nuke/guide/iran/missile/mushak.htm>

double-base et composite et à la maîtrise de cette technologie. Ce d'autant que Téhéran ne cherche pas forcément à disposer de missiles de portée supérieure à 1 000 km à propulsion solide pour répondre à ses objectifs militaires et/ou stratégiques. Ainsi, il paraît envisageable que la république islamique cherche avant tout à améliorer la qualité opérationnelle de son parc d'engins à vocation de théâtre en mettant au point des systèmes capables de se substituer aux SCUD. Cet objectif pourrait être atteint par le développement de chargements composites relativement rustiques comparables à ceux équipant le Shaheen-I ou le M-9 chinois⁶⁸.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de l'état d'avancement connu des programmes de propulsion solide engagés par les nouveaux entrants :

- ➔ Le niveau atteint par l'Inde dans le domaine des propergols composites semble *a minima* équivalent à celui de la Chine. Les travaux menés par l'ISRO dans le cadre du développement des lanceurs indiens, permis par l'accès aux données de la NASA sur le lanceur Scout dans les années 1960-70, ont permis à l'agence de défense de mettre au point des moteurs de plus en plus performants pour les missiles stratégiques. La dualité entre les applications spatiales et missiles est donc très marquée, en particulier dans la mesure où il ne pèse que peu de contraintes de dimension sur les blocs, comme ce serait par exemple le cas pour l'équipement de sous-marins lanceurs d'engins.
- ➔ Le programme pakistanais paraît encore dépendant de l'accès aux technologies chinoises pour les engins de la gamme Shaheen. Toutefois, les transferts qui auraient été réalisés dans les années 1990 pourraient avoir permis aux techniciens et ingénieurs pakistanais d'acquérir une certaine compétence pour la réalisation de propergols composites destinés à des applications balistiques (600 km).
- ➔ L'Iran possède vraisemblablement un niveau suffisant pour réaliser des propergols double base destinés à une série de roquettes et d'engins de courte portée. Malgré des informations portant sur l'existence d'une coopération avec la Chine, aucun projet de missile reposant sur l'utilisation de propergols composites ne semble avoir abouti. Cette situation pourrait signifier que les investissements iraniens dans cette technologie sont limités et cohérents avec la recherche de solutions opérationnelles.

1.2.4 – Qualité, sécurité et durabilité

Dans le domaine des propergols solides composites, outre les performances énergétiques souhaitées, plusieurs caractéristiques opérationnelles sont généralement attendues :

- ➔ Durée de vie du chargement : il s'agit du temps pendant lequel le chargement peut être utilisé et fournir les performances attendues sans défaillance. Sachant que le propergol va être stocké pendant plusieurs années dans un missile – parfois dans des conditions d'environnement contraignantes (température, humidité) –, le fabricant doit pouvoir garantir que le bloc fonctionnera pendant l'ensemble de sa durée de vie.
- ➔ Sécurité pyrotechnique du chargement : autant pendant leur durée de vie qu'au cours de leur fabrication, les propergols stockés doivent être stables dans les conditions de stockage et d'emploi. En cas d'accident (incendie, décharge électrostatique, détonation à proximité...), des risques de détonation ou de combustion accidentelle existent qui

⁶⁸ Le diamètre extérieur étant d'un mètre.

doivent être pris en compte et minimisés. Cette exigence a conduit en Occident à des travaux de développement sur les munitions à risques atténués (MURAT).

Il s'avère que la qualité de la conception et de la production des chargements de propergol composite joue un rôle clef pour déterminer *in fine* la capacité du chargement à répondre à ces besoins opérationnels. Or, pour parvenir à des niveaux élevés de qualité, les propergolistes doivent parfaitement maîtriser les processus de fabrication (préparation des charges solides, malaxage, coulée) et être capables de prévoir les phénomènes qui pourraient modifier les performances de leur produit tout au long de leur durée de vie.

C'est probablement dans ce domaine de la qualité et de la sécurité que l'expérience industrielle accumulée sur des cycles longs (dizaines d'années et plusieurs programmes) marque une différence importante entre les États développant des propergols solides. En effet, les progrès qui peuvent être obtenus en la matière dépendent essentiellement d'un cycle d'apprentissage pratique qui résulte à la fois de la gestion (et de la résolution) des problèmes rencontrés pendant le développement et la production, des retours d'expérience sur les chargements durant leur vie et à la fin de celle-ci et de la mise au point par incrément d'outils et de processus destinés à améliorer la qualité des produits. Ainsi, dans le domaine de la sécurité, les travaux sur la limitation des risques électrostatiques ont été conduits en France par la SNPE à la suite d'incidents survenus lors de la production⁶⁹. Cette expérience a été notamment exploitée pour déterminer les causes d'un accident survenu en Allemagne en 1985 lors de l'assemblage d'un missile américain Pershing 2⁷⁰.

Cette accumulation d'expériences se traduit concrètement par l'allongement des durées de vie des compositions ainsi que par une fiabilité plus importante. En termes de développement, elle permet comme nous l'avons vu de mettre au point divers outils de simulation portant sur la fabrication – par exemple, effet de la coulée de plusieurs mélanges malaxés séparément, extraction du noyau hors du chargement de propergol pour les formes complexes –, sur le comportement du propergol en fonction du temps ou encore sur les effets de perturbation environnementale sur la stabilité du chargement. L'existence de ces moyens facilite considérablement le développement de nouveaux chargements, y compris quand ces derniers ont des formes complexes ou des compositions nouvelles, mais elle participe aussi à rendre plus sûre et plus efficace – donc moins coûteuse – la production, ou encore à diminuer le nombre d'essais nécessaires pour la mise au point d'un chargement.

De la même façon, les travaux de recherche qui sont menés en parallèle de l'activité industrielle sont nourris par les efforts de développement autant qu'ils permettent la mise au point de propergols ou de matériaux nouveaux ou de procédés de fabrication plus efficaces. Cette interaction s'avère être au cœur des progrès réalisés par les pays les plus avancés en matière de propulsion solide tant pour les performances des produits que pour l'efficacité des méthodes de production.

Il convient enfin de noter que la contrainte environnementale commence également à se faire sentir davantage dans ce secteur industriel, pour les effets de la combustion des chargements – ce qui conduit à entreprendre des études pour trouver des substituts au

⁶⁹ A. Davenas et R. Rat, « Sensitivity of Solid Rocket Motors to Electrostatic Discharge: History and Future », 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 20-24 June 1999, p. 1.

⁷⁰ Ibid, p. 4.

perchlorate d'ammonium – et, surtout, pour la destruction des chargements de propergol à la fin de leur durée de vie.

1.2.5 – Conclusions

Pour établir une comparaison entre les divers pays possédant un savoir-faire et une capacité industrielle pour l'élaboration et la fabrication de propergols solides, il paraît utile de proposer quelques critères permettant de déterminer le degré de maîtrise pour les diverses technologies concernées :

- ➔ Propergols solide double base : il s'agit là de la capacité élémentaire de fabrication de blocs de propergols ayant des propriétés énergétiques suffisantes pour la propulsion de petits engins (diamètre limité à environ 300 mm mais possibilité de mise en fagot de plusieurs chargements).
- ➔ Propergols composites de type butalaneTM de dimensions limitées (un mètre de diamètre, quelques mètres de longueur) : la capacité de concevoir et de fabriquer des chargements composites ayant des performances énergétiques suffisantes pour des missiles balistiques à courte ou moyenne portée. Ceci implique notamment la maîtrise des aspects mécaniques, thermiques et aérodynamique liés au fonctionnement des propergols. *A contrario*, on peut estimer que ce niveau de maîtrise ne comprend pas forcément la possession d'outils de simulation très complexes permettant d'effectuer des prévisions précises sur les phénomènes liés à la combustion du chargement, sur les conditions de préparation industrielles ou sur le vieillissement.
- ➔ Propergols composites de type butalaneTM très énergétiques pour de grandes dimensions : destinés soit à des applications stratégiques (missiles lancés depuis une plate-forme mobile et de plusieurs milliers de kilomètres de portée) soit à des applications spatiales. Ce niveau de maîtrise implique la capacité de concevoir et de fabriquer des chargements de forme complexe optimisés en termes de propriétés énergétiques. Il inclut également la possession et la maîtrise des outils de simulation et d'essais permettant le développement de ce type de chargement.
- ➔ Nouveaux matériaux énergétiques (nitralsTM ou autres) : il paraît possible de diviser cette catégorie entre les pays ayant une connaissance théorique de la formulation et des performances de propergols utilisant de nouveaux composés et ceux ayant la capacité de produire ce type de chargement. Il convient toutefois de rappeler que les performances et les caractéristiques physiques de certains de ces propergols peuvent être sujettes à caution⁷¹.

⁷¹ C'est le cas par exemple pour l'ADN. Voir M. B. Talawar et al, « Emerging Trends in Advanced High Energy Materials », op. cit., p. 63.

	PROPERGOLS DB	PROPERGOLS COMPOSITES « SIMPLES »	PROPERGOLS COMPOSITES « MODERNES »	NOUVEAUX MATÉRIAUX ÉNERGÉTIQUES
États-Unis	Maîtrisé	Maîtrisé	Maîtrisé Outils de simulation R&D	Recherche Production (Trident II-D5)
France	Maîtrisé	Maîtrisé	Maîtrisé Outils de simulation R&D	Recherche Développement Production (démonstrateur de deuxième étage)
Russie	Maîtrisé	Maîtrisé	Capacités de production R&D	Recherche
Chine	Maîtrisé	Maîtrisé	Capacités de production R&D	Recherche
Inde	Maîtrisé	Maîtrisé	Capacités de production R&D	Pas de travaux connus
Pakistan	Maîtrisé	Capacités de production	Capacités de production	Pas de travaux connus
Iran	Maîtrisé	R&D	Pas de travaux connus	Pas de travaux connus
Italie	Maîtrisé	Maîtrisé	Maîtrisé	Pas de travaux
Japon	Maîtrisé	Maîtrisé	Maîtrisé	Recherche
Israël	Maîtrisé	Maîtrisé	Maîtrisé	NC

**TABEAU 2 : NIVEAUX RELATIFS DES ÉTATS CAPABLES
DE PRODUIRE DES PROPERGOLS SOLIDES**

Le tableau 2 permet une comparaison sur la base de ces critères entre les pays que nous avons mentionnés précédemment. Il en ressort qu'il existe plusieurs groupes de pays :

- ➔ Le premier comprend les États-Unis et la France qui possèdent une avance substantielle pour la mise au point et la réalisation de chargements complexes et ayant des performances énergétiques importantes. Cette avance se traduit par la capacité à développer des nouveaux matériaux énergétiques mais également à diminuer les coûts de développement de nouveaux propergols par l'utilisation d'outils de prédiction (plutôt que par des essais).
- ➔ Le deuxième est constitué de la Russie, de la Chine et de l'Inde (ainsi que du Japon, de l'Italie et d'Israël), qui sont capables de produire des chargements de propergol composite de fort diamètre pouvant propulser des masses utiles à des distances de plusieurs milliers de kilomètres mais ne disposeraient pas d'une expérience suffisante pour traduire immédiatement cette capacité pour le développement de nouveaux chargements ou de nouveaux composés plus performants.

- ➔ Le dernier, auquel appartiennent l'Iran et le Pakistan, rassemble les pays ayant maîtrisé la production de propergols homogènes et qui possèderaient une capacité de production de propergols composites simples. Ces pays dépendent d'une assistance extérieure soit pour l'accès aux matières premières, soit en termes de conception et/ou de fabrication.

En définitive, il n'existe aujourd'hui qu'une poignée de pays maîtrisant totalement le cycle de développement et de production des propergols composites avancées. Ce savoir-faire permet à la fois de réduire les coûts et les risques liés au développement et à la réalisation de nouveaux moteurs mais également d'améliorer à la fois la compacité et les performances des missiles.

Dans le domaine spatial, même si les dimensions des engins ne constituent pas une contrainte forte, on peut concevoir des chargements de très grandes dimensions (longueur et diamètre) – qui peuvent être relativement plus rustiques en termes de composition et de géométrie – en limitant la phase d'essais et les risques liés au développement.

Le niveau atteint en Occident résulte d'investissements massifs engagés depuis près de 50 ans dans les technologies et les domaines scientifiques des propergols solides. Il convient toutefois de souligner que, en grande partie, les succès rencontrés par les deux grands acteurs du domaine (France et États-Unis) sont dus à la convergence entre des investissements pratiques dans le développement, la production et les moyens d'essais et les efforts en matière de recherche appliquée.

Se pose donc à terme la question des conditions de la pérennité et de l'accroissement des compétences et des savoir-faire et donc des investissements nécessaires pour répondre à des besoins qui devront également être fixés. Il paraît par conséquent utile de déterminer quels pourraient être à court et moyen termes les programmes qui pourraient nécessiter le développement de propergols composites. De la même manière, il est nécessaire de cerner les investissements indispensables à réaliser pour enrichir un socle de connaissances et de savoir-faire suffisant pour être en mesure à la fois de développer de nouveaux chargements à un horizon lointain mais également de permettre la maintenance des systèmes déployés, en cours de déploiement ou qui arriveraient à la fin de leur cycle de vie.

1.3 – Conditions du choix entre propulsion solide et liquide

Le choix entre les deux modes de propulsion devrait relever, en théorie, d'une analyse des avantages offerts par chaque solution par rapport aux besoins exprimés par les autorités politiques du pays concerné et aux exigences opérationnelles qui peuvent peser sur le déploiement ou encore l'utilisation des missiles. Ainsi, un pays qui chercherait à disposer d'une composante embarquée sur sous-marin serait naturellement amené à investir dans le développement de chargements à propergols solides composites.

Mais l'analyse que nous avons pu faire des développements de la plupart des puissances balistiques et des pays émergents dans le domaine montre que des facteurs pratiques influencent de manière importante les décisions de ces acteurs :

- ➔ Capacités et/ou compétences immédiatement disponibles : pour la plupart des États, le lancement d'un programme national s'appuie sur les moyens ou les compétences dont il peut disposer initialement. Ainsi, le choix irakien de mettre au point des missiles à propulsion liquide tient-il avant tout à la possession d'un nombre important

de SCUD et donc à la possibilité d'en effectuer l'expertise pour le reproduire. De la même façon, le choix initial de la Chine de s'engager dans la filière liquide est dû à l'existence d'une coopération avec l'Union Soviétique portant sur des transferts de savoir-faire. Il convient toutefois de souligner que le choix initial peut être remis en question par l'existence de besoins ou d'impératifs stratégiques spécifiques. Ainsi, la Chine débute le développement des propergols solides dans les années 1980 pour assurer à ses missiles balistiques un niveau de fiabilité, donc de crédibilité, compatible avec sa doctrine nucléaire.

- ➔ Capacité de financement et accès aux technologies ou aux biens : pour certains pays, la mise au point d'un moteur fusée pose des difficultés en l'absence d'une base industrielle et technologique de défense suffisante pour fabriquer ou produire certains sous-ensembles. Ces derniers ne peuvent donc être obtenus que via l'acquisition auprès de fournisseurs extérieurs. L'accessibilité de certains biens et le coût qui peut y être associé – par exemple dans le domaine des propergols solides, les matières premières ou encore les moyens d'essais – pèsent donc sur les choix réalisés et les résultats obtenus. Dans ce domaine, il convient de souligner que les nouveaux entrants se trouvent confrontés à l'existence de mécanismes de régulation internationaux et nationaux visant à limiter les flux de biens et de technologies touchant à la propulsion anaérobie. Le *Missile Technology Control Regime* (MTCR), groupe de pays fournisseurs responsables établi en 1987 et qui compte 34 membres, élabore pour ses membres des règles concernant le contrôle des transferts de technologies et de biens vers des pays développant des programmes spatiaux ou de missiles balistiques. *A contrario*, l'existence de coopérations dans le domaine des missiles ou encore de pays disposés à exporter des systèmes complets ou encore leurs savoir-faire peut faciliter des programmes mais contribue également à façonner les choix techniques qui sont réalisés.

On peut dès lors distinguer en réalité deux catégories de puissances balistiques. La première, à laquelle appartiennent les États-Unis, la France, la Russie ou la Chine (dans une moindre mesure l'Inde), dispose d'une compétence de développement propre appuyée sur des compétences industrielles et techniques établies. Cela se traduit notamment par la possibilité d'effectuer des choix technologiques correspondant à des besoins stratégiques ou opérationnels et de réaliser les systèmes correspondants. Ces pays disposent en outre d'un bon niveau d'autonomie en termes d'accès aux biens et aux matières premières nécessaires à leurs programmes.

Une seconde catégorie, dans laquelle la plupart des proliférants se trouvent, regroupe les pays dont les programmes et les choix techniques reposent pour tout ou partie sur l'accès à des fournisseurs extérieurs ou sur des coopérations avec des États autonomes. Ainsi, le passage du développement d'un type de propulsion accessible immédiatement, généralement basé sur un moteur de type SCUD et l'utilisation d'ergols liquides, à un autre qui ne l'est pas s'avère problématique à la fois d'un point de vue technique et en termes financiers. Pour prendre un exemple, les projets irakiens de mise au point dans les années 1990 d'un chargement de propergol composite destiné à un missile de 150 km de portée se sont heurtés à la fois à l'absence d'outil industriel adapté, au manque d'expérience dans les processus de fabrication (en particulier la coulée de

plusieurs mélanges) et à des difficultés à obtenir les matières premières clefs (entre autres le perchlorate d'ammonium et le liant polybutadiène)⁷².

En définitive, le choix entre propulsion solide ou liquide s'impose donc à cette catégorie de pays plutôt qu'il ne résulte d'une démarche classique de définition du besoin et de recherche de solutions adaptées. Une fois la filière de propulsion choisie, même s'il peut exister des efforts pour en développer d'autres, elle devient généralement le socle unique du développement de missiles balistiques. Il convient toutefois de souligner que, dans certaines circonstances, par exemple l'accès à une nouvelle source de technologies et/ou de missiles offrant des gains potentiels sur les performances, la situation peut évoluer. L'achat par le Pakistan de missiles nord-coréens Nodong, à propulsion par ergols liquides, à partir de 1993⁷³ semble s'inscrire dans cette logique ; offrant à Islamabad un gain immédiat – en termes de portée, de capacité de déploiement et donc vis-à-vis du concurrent indien de crédibilité – par rapport aux engins en développement reposant, quant à eux, sur des chargements de propergol solide et dont la mise au point s'avérait problématique. On notera toutefois que, malgré l'existence de cette filière en propulsion liquide nord-coréenne, les travaux du Pakistan sur les propergols solides se sont poursuivis.

⁷² Rapport de l'*Iraq Survey Group*, 30 Septembre 2004. Voir <http://www.globalsecurity.org/wmd/library/report/2004/isg-final-report/>

⁷³ Chaim Braun and Christopher Chyba, « Proliferation Rings », *International Security*, Vol. 29, N° 2, Fall 2004, pp. 11-13.

2 – **Futures capacités stratégiques et propulsion solide**

La mise en place par les États-Unis de la nouvelle triade, comprenant, outre les capacités de dissuasion nucléaire, des moyens conventionnels offensifs et un système de défense antimissile, fait d'ores et déjà appel à la compétence des industriels américains pour la mise au point et la production de nouveaux moteurs à propergols composites.

Ainsi, pour ce qui concerne la capacité de frappes rapides globales (*Prompt Global Strike*), les États-Unis envisagent dans un premier temps la conversion d'une partie de leurs missiles stratégiques pour remplir la mission fixée par les documents stratégiques de référence (*Nuclear Posture Review* de 2001 et *Quadrennial Defense Review* de 2001 et 2005)⁷⁴.



Figure 14 : Le moteur du KEI sera développé par ATK

Dans le domaine de la défense antimissile, outre les systèmes déjà entrés en phase de production et qui s'appuient sur des motorisations à propergol composite (Patriot, SM-3⁷⁵), la propulsion de nouveaux intercepteurs, comme le système d'interception de missiles assaillants durant leur phase propulsée *Kinetic Energy Interceptor* (KEI), devrait reposer sur des solutions à propergol solide de nouvelle génération, dans la mesure où ils nécessitent d'accéder à des niveaux d'accélération et de vitesse finale, donc d'impulsion, très élevés⁷⁶.

Ces deux projets sous-tendent, outre-Atlantique, des enjeux politiques, techniques et opérationnels de première importance, en particulier dans la mesure où ils accompagnent une évolution profonde de la perception stratégique américaine et des moyens qui doivent y être associés (ou qui doivent être créés pour satisfaire les intérêts américains). Techniquement parlant, ils permettront aux deux motoristes américains (ATK et Aerojet) de poursuivre les recherches sur de nouveaux propergols et de développer leurs compétences industrielles.

On peut toutefois légitimement s'interroger à la fois sur l'avenir de ces projets autant que sur leur éventuel influence sur nos propres capacités techniques et industrielles dans le domaine des propergols solides. L'arrivée aux affaires en 2009 d'une nouvelle administration pourrait être de nature à modifier profondément à la fois les orientations choisies par le gouvernement Bush mais également à ouvrir de nouvelles perspectives en termes de coopérations internationales. L'un des points clefs tiendra sans doute au rôle qu'aura l'Alliance atlantique (et à ses responsabilités dans un programme) dans la

⁷⁴ B. Gruselle, « La place des frappes conventionnelles dans la stratégie américaine », Notes de la FRS, 27 décembre 2007, pp. 4-5.

⁷⁵ Pour ce dernier, par exemple, le troisième étage propulsif ainsi que son dispositif de contrôle d'attitude et de pilotage sont réalisés par ATK. « ATK plays critical roles in Successful SM-3 Intercept », *PRNewswire-FirstCall*, April 27th, 2007.

⁷⁶ L'objectif pour le KEI est une vitesse finale de l'ordre de 7 km/s (à terme une version pouvant atteindre 8 km/s est envisagée). Voir <http://www.janes.com/extracts/extract/jsws/jsws9078.html>

poursuite d'une éventuelle défense antimissile balistique européenne. Un autre sera sans doute lié aux formes que pourraient prendre des coopérations industrielles et étatiques, notamment en matière de défense antimissile.

Même s'il est vrai que ces questions revêtent un aspect central pour la filière des propergols solides à caractère stratégique en France, plusieurs autres problématiques méritent d'être examinées :

- ➔ L'intérêt des programmes spatiaux pour mobiliser et développer un socle minimal de compétences dans le domaine de la propulsion : comme nous l'avons évoqué précédemment, la production de lanceurs spatiaux n'exige pas forcément un degré de sophistication très important du point de vue de la conception même si leur réalisation peut s'avérer complexe. Cependant, il est susceptible de permettre la pérennisation de savoir-faire et d'outils de production, d'essai et de simulation essentiels pour, le cas échéant, relancer rapidement des programmes stratégiques. Cette question soulève la problématique de la dualité réelle entre la propulsion à vocation spatiale et celle destinée à des applications à caractère stratégique, en particulier dans le domaine des missiles.
- ➔ Le rôle que peut jouer un outil de production de propergols pour missiles et engins tactiques dans la conservation et l'accroissement des compétences dans le domaine stratégique. La mise au point de composés énergétiques pour des applications à caractère non stratégique (défense sol-air, antimissile de théâtre, air-air...) mais demandant de fortes accélérations et/ou vitesses finales nécessite vraisemblablement une poursuite des investissements techniques et technologiques dans le développement de composés de nouvelle génération. De la même façon, certains sous-systèmes, par exemple destinés au pilotage rapide des engins, nécessitent des travaux dans ce domaine. Il convient en conséquence d'explorer les possibilités de transferts de connaissances entre le domaine stratégique et tactique et de jouer sur les synergies entre ces deux secteurs pour faciliter la pérennisation des savoir-faire.

2.1 – Impact de l'évolution des projets américains de la nouvelle triade

2.1.1 – La défense antimissile

Parmi les projets à caractère stratégique portés par l'administration Bush depuis son élection en 2000, la défense antimissile est celui qui a connu la hausse budgétaire la plus importante et la publicité nationale et internationale la plus intense. Ainsi, entre 2002 et 2009 les sommes allouées aux divers programmes se sont montées à une moyenne annuelle de 7 milliards de dollars progressant de 3 milliards par an par rapport aux financements antérieurs⁷⁷. Si une partie de cette hausse a permis d'engager la production d'un certain nombre de systèmes (PAC-3 en cours de déploiement, SM-3 en cours de déploiement, THAAD premiers déploiements prévus en 2009), elle a également été utilisée pour accélérer la mise au point et le déploiement du dispositif de protection du territoire des États-Unis. Ainsi, dès 2004, Washington a pu procéder progressivement à

⁷⁷ B. Gruselle, « Nouvelle triade, conventionnalisation des moyens de dissuasion et équilibres stratégiques », FRS, *Recherches et Documents*, 8 janvier 2008, pp. 8-9.

la mise en place de onze intercepteurs GBI en Californie et en Alaska⁷⁸, nombre qui devrait continuer à croître dans les années qui viennent⁷⁹.

En outre, une partie des budgets a été investie dans le développement incrémental d'une nouvelle génération d'intercepteur comprenant le KEI ou encore le *Multiple Kill Vehicle* (MKV)⁸⁰. Ces deux programmes visent d'ores et déjà à proposer des solutions pour les futurs moyens destinés à la défense antimissile. Le programme KEI, en particulier, cherche à mettre au point un propulseur fournissant un niveau d'accélération très important afin de permettre des interceptions de missiles assaillants en phase propulsée. Il pourrait également être adapté à des missions plus classiques de défense du territoire afin de pouvoir remplacer à terme le *Ground Based Interceptor* (GBI). Pour ce projet, la *Missile Defense Agency* (MDA) envisage d'investir plus de 3 milliards de dollars de 2006 à 2013, dont 214 millions en 2008⁸¹. Entre 2004 et 2007, le projet a déjà reçu 940 millions de dollars et le coût total de développement est estimé à environ 6 milliards de dollars⁸².

	ANNÉE FISCALE 2004	ANNÉE FISCALE 2005	ANNÉE FISCALE 2006	ANNÉE FISCALE 2007	ANNÉE FISCALE 2008	TOTAL
Budget présenté	301	511,25	229,7	405,5	227,5	1674,95
Budget obtenu	114,7	272	200,5	356	347,5	1290,7

**TABLEAU 3 : FINANCEMENT ACCORDÉ AU PROGRAMME KEI DEPUIS 2004,
 EN MILLIONS DE DOLLARS (SOURCE CENTER FOR DEFENSE INFORMATION)**

Les efforts consentis par l'administration américaine pour ce programme permettent avant tout de financer les travaux de développement de nouveaux propulseurs⁸³. En effet, la restructuration intervenue en 2007 a conduit à recentrer le programme sur la mise au point de la partie accélérateur, sachant que le KEI a pour vocation de répondre à un besoin qui serait *a priori* couvert par le laser aéroporté (ABL). On notera en outre que les législateurs américains, tout comme un certain nombre de spécialistes, s'interrogent sur la pertinence et la faisabilité de cette solution⁸⁴. Pour autant, le budget a été consolidé, y compris par le Congrès à majorité démocrate, en arguant des retards et difficultés liés à

⁷⁸ Ibid, p. 16.

⁷⁹ Vingt quatre intercepteurs (21 en Alaska, 3 en Californie) seraient déployés en 2007 selon le Pentagone. Cf. <http://www.mda.mil/mdalink/pdf/budgetfy08.pdf>

⁸⁰ <http://www.mda.mil/mdalink/pdf/bmdsbook.pdf>

⁸¹ <http://www.mda.mil/mdalink/pdf/budgetfy08.pdf>

⁸² Sam Black, « The Kinetic Energy Interceptor: missile without a cause », Center for Defense Information, August 16th 2007.

⁸³ Lt-General Obering, Director MDA, « Missile Defense Program and Fiscal Year 2008 Budget », hearing before the House Armed Services Committee, March 27th, 2007.

⁸⁴ Sam Black, « The Kinetic Energy Interceptor: missile without a cause », op. cit.

la mise au point de l'ABL ainsi que de la nécessité d'engager des travaux pour le développement d'une version mobile du système⁸⁵.

L'avenir du programme dépend bien entendu de l'approche de la prochaine administration vis-à-vis de la problématique de la défense antimissile. Mais la plupart des candidats démocrates comme républicains s'avèrent, sur ce sujet, favorables à la poursuite du programme engagé par le président Bush⁸⁶. Les équipes qui sont susceptibles de succéder sur les questions de sécurité à celles actuellement en place auront vraisemblablement à prendre en compte plusieurs facteurs :

- ➔ Proposer des solutions pour réduire le budget de la défense : dans ce cadre, les programmes de recherche et développement en matière de défense antimissile pourraient être maintenus à condition de mettre un terme à certains projets coûteux et/ou incertains sur un plan technique. Le laser aéroporté pourrait faire les frais d'un calcul de ce type – du fait à la fois des dépassements de budget, des retards de calendrier et des critiques quand à sa faisabilité technique et à son efficacité opérationnelle⁸⁷ – ce qui conduirait à renforcer la légitimité du KEI comme solution pour l'interception des missiles en phase propulsée. En outre, dans la mesure où la poursuite du déploiement d'une protection du territoire serait décidée, le KEI pourrait être de nouveau présenté comme remplacement possible à terme des intercepteurs GBI actuellement en service, voire des SM-3 déployés sur des bâtiments équipés du système AEGIS.
- ➔ Maintenir une activité suffisamment importante chez les motoristes pour conserver et accroître la compétence industrielle et scientifique acquise : ATK et Aerojet ont été consolidées depuis 2001 et fournissent les moteurs destinés aux applications militaires stratégiques et tactiques comme aux lanceurs spatiaux. Il s'agit de ce point de vue d'entreprises ayant un rôle critique pour les États-Unis. De fait, les deux sociétés dépendent pour l'essentiel de leur budget des programmes du département de la défense et de la NASA. La poursuite d'un programme visant à la mise au point d'un démonstrateur de chargement de propergol solide futur paraît dans cette perspective s'imposer en tant que choix politique et technique.
- ➔ Evaluer le volet international de la *Missile Defense* : l'extension de la MD à l'Europe a fait l'objet de débats au sein des Chambres et, d'une certaine manière au sein de l'Administration⁸⁸. Sur le budget demandé initialement par le Pentagone, la partie consacrée à la construction et à l'équipement du site qui serait construit en République tchèque a été approuvée tandis que le budget a été réduit pour la seule production des intercepteurs initialement destinés à la Pologne⁸⁹. On peut envisager plusieurs options politiques à l'échéance de la prochaine élection américaine : l'obtention d'un accord entre les États-Unis et la République tchèque sur le site de radar est vraisemblable ; le cas polonais paraît plus incertain, dans la mesure où Varsovie souhaite une discussion préalable entre Russes et Américains avant de

⁸⁵ En particulier, la mise au point d'un container permettant d'adapter le missile sur une gamme étendue de porteurs. Voir http://www.northropgrumman.com/missiledefense/Docs/KEI_06_FINAL_081606.pdf

⁸⁶ Sur cette question, il convient de souligner que Mme Clinton, par exemple, s'est prononcé en faveur du déploiement d'un système. <http://www.fpif.org/fpifxt/4811>

⁸⁷ <http://www.americanphysicsociety.net/about/pressreleases/boosts2.cfm>

⁸⁸ Martin Sief, « Euro-base blues », BMD Focus, November 16th, 2007.

⁸⁹ http://www.ucsusa.org/global_security/missile_defense/house-appropriations-defense.html

conclure le moindre accord avec Washington⁹⁰. L'autre partie du débat concerne le rôle de l'Alliance atlantique dans la création d'une protection antimissile européenne. Pour l'instant, l'OTAN poursuit des études pour déterminer quels seraient les meilleurs choix techniques et opérationnels pour satisfaire un éventuel besoin, celui-ci faisant du reste l'objet de débats entre les membres de l'Alliance. La question, qui devrait être essentiellement traitée sur la base de considérations stratégiques (nature du besoin, organisation opérationnelle, solutions possibles, gestion des relations avec la Russie), est compliquée par les aspects pratiques et financiers du problème. Les investissements qui pourraient être envisagés pèseraient sur des budgets européens de défense en diminution.

Cette réalité peut conduire à trois options de développement :

- ➔ Pas de défense antimissile pour l'Europe en l'absence d'une définition de la menace faisant l'objet d'un consensus (le scénario « allemand »).
- ➔ Un système de défense antimissile contrôlé et opéré par les forces américaines sans intervention européenne (le scénario « polonais »).
- ➔ Un dispositif sous contrôle de l'Alliance atlantique et rassemblant des moyens européens et américains (le scénario « OTAN » qui pourrait être un scénario français).

La première possibilité s'avère être la moins probable, même si Washington peut renoncer à un déploiement d'intercepteurs en Europe dans le cadre d'un accord avec la Russie, il continuera *a minima* d'utiliser les radars dont il dispose au Royaume-Uni et au Groenland. Il est aussi assez peu vraisemblable que la prochaine Administration ignore les critiques émises par le Kremlin en poursuivant sur une base bilatérale la mise en place d'une composante européenne de sa *Missile Defense*. En définitive, le dernier scénario semble être le plus plausible à l'horizon de la période post-électorale aux États-Unis. En premier lieu, il s'inscrit dans la logique de l'établissement en Europe d'une capacité connectée au dispositif américain, option qui n'est pas remise en question par les candidats actuels. Par ailleurs, il présente l'avantage de laisser à l'Alliance la responsabilité de trouver avec la Russie un accord sur les conditions du déploiement. Au vu des réactions de certaines capitales européennes sur le projet du « troisième site »⁹¹, cette solution permettrait en outre de rétablir un consensus assez large sur la protection de l'Europe. *A contrario*, elle va sans doute fortement ralentir voire bloquer toute mise en œuvre pratique d'un projet commun si celui-ci repose sur le développement européen d'une capacité propre.

La défense antimissile constitue pour l'avenir de la filière des propergols solides aux États-Unis un atout important. Elle permet en particulier de poursuivre les investissements de développement pour la mise au point de chargements de propergol solide plus performants mais également de pérenniser l'appareil de production industriel à travers la fabrication des intercepteurs à caractère stratégique (GBI). A ce titre, mais également parce que la protection du territoire restera vraisemblablement une priorité politique américaine – à laquelle ne s'oppose du reste aucun engagement juridique après

⁹⁰ « US still confident of missile shield deal with Poland », *Defense News*, January 8th, 2008.

⁹¹ Viola Herms Drath, « EU divided over missile defense shield », *The Washington Times*, March 25th, 2007.

le retrait du traité ABM en 2001⁹² –, il faut conclure que la prochaine administration poursuivra dans ses grandes lignes le projet engagé depuis 2001.

Pour ce qui est de la France et de l'Europe, il est improbable que des marges financières se dégagent à court ou moyen terme pour lancer un projet de défense antimissile visant à mettre au point un système complet (comprenant des intercepteurs, des capteurs et le système de commandement, de contrôle et d'alerte). Pour autant, plusieurs pistes pourraient être considérées pour permettre aux alliés européens de contribuer à la mise en place d'une capacité antimissile. Un choix s'impose donc sur les domaines qui pourraient être investis dans le cadre d'une telle démarche autour de quelques critères :

- ➔ **Politique** : les briques que pourraient apporter les Européens à un système de défense antimissile de l'Alliance doivent leur permettre de jouer un rôle dans le processus opérationnel de planification et de décision lié à l'engagement des moyens de défense antimissiles. Par construction, l'architecture de défense antimissile est distribuée puisqu'elle doit prendre en compte des éléments de niveau régional et global mais également une diversité de moyens et de missions (recueil et fusion de données, distribution, planification et engagement)⁹³. Ce fonctionnement en réseau fait jouer un rôle clef au système de commandement et de contrôle. Une participation à sa définition et à son développement paraît par conséquent impérative pour comprendre et négocier les mécanismes d'utilisation des moyens de la défense antimissile et assurer la compatibilité des moyens dont nous disposerions avec les systèmes de nos alliés. Dans le domaine des capteurs, il s'agit essentiellement à court terme de vérifier la capacité des outils en développement ou existants à fonctionner en réseau afin de fournir des données d'alerte de niveau européen. Celle-ci permettrait notamment d'améliorer l'autonomie d'analyse européenne et de décision vis-à-vis des États-Unis. Enfin, dans le domaine des intercepteurs, outre l'intégration nécessaire des systèmes basse-couche (SAMPT, PAC3) qui peut être conduite dans le cadre du projet ALTBMD de l'OTAN, l'Europe pourrait considérer la possibilité d'engager des développements exploratoires complémentaires sur un système exoatmosphérique (ou haut endoatmosphérique) afin de préparer le cas échéant la mise en place d'une coopération entre pays européens ou transatlantiques.
- ➔ **Industriel et technique** : il paraît nécessaire, comme le font visiblement les États-Unis, de considérer également les éventuels investissements dans le domaine de la défense antimissile comme visant à pérenniser nos capacités de développement stratégique. En d'autres termes, il s'agit de choisir des domaines dans lesquels nous possédons des compétences établies et uniques qui pourraient disparaître faute de programmes de développement. Dans cette perspective, un programme de démonstrateur d'intercepteur exoatmosphérique présenterait l'intérêt de poursuivre le développement de la filière des engins stratégiques à propulsion par propergol solide pour lesquels il n'existe pas de perspective claire au-delà du M-51. Si elle se présente, l'opportunité de coopérer avec les États-Unis pour la conception et la production d'un intercepteur adapté au théâtre européen pourrait être saisie afin de réduire les investissements nécessaires. Cependant, dans un tel cas de figure il serait sans doute impératif de choisir les sous-systèmes pour lesquels nous voudrions avoir

⁹² Nous ne nous trouvons donc pas dans une situation semblable à celle existante lors de la décision du président Clinton de ne pas déployer la NMD en 1999.

⁹³ B. Gruselle, « Nouvelle triade, conventionnalisation des moyens de dissuasion et équilibres stratégiques », op. cit., pp. 13-14.

la responsabilité du développement. Un exemple intéressant de ce type de coopération peut être trouvé dans le cas japonais. Tokyo a en effet engagé depuis 1999 un programme de recherche commun avec les États-Unis sur les intercepteurs et a signé en 2006 un nouvel accord (d'environ 2 milliards de dollars) pour la mise au point d'un missile naval destiné à remplacer en 2014 le missile standard-3 (SM-3)⁹⁴. Dans le cadre de cet accord, le développement porterait sur la réalisation d'un nouveau moteur et, de façon générale, sur la modernisation du SM-3.

Ainsi, si la France choisissait de poursuivre son soutien à la mise en place d'un système de défense antimissile de l'OTAN, elle pourrait faire valoir son savoir-faire technique et industriel pour participer à d'éventuels développements européens ou transatlantiques. Si en termes de choix politiques notre participation devrait se concentrer sur les moyens de commandement et de contrôle, il semble également judicieux, d'un point de vue industriel, de s'impliquer dans la recherche de solutions en matière d'interceptions haut endoatmosphériques ou exoatmosphériques.

Si un tel choix devait être fait, le développement de propergols solides très énergétiques⁹⁵ et des chargements associés devrait vraisemblablement être engagé afin de répondre aux besoins spécifiques de la propulsion des intercepteurs antimissiles et de leur pilotage.

2.1.2 – Le programme de frappes conventionnelles rapides

Détenir la capacité de procéder à des frappes conventionnelles à caractère stratégique afin de neutraliser toute cible potentielle⁹⁶ avec un faible préavis (typiquement moins d'une heure) fait partie des objectifs fixés par l'administration dans le cadre de la révision de doctrine engagée dès le premier mandat du président Bush et matérialisée dans la *Nuclear Posture Review* de 2001⁹⁷. Le programme de frappes rapides globales (*Prompt Global Strike*-PGS) doit donc fournir à l'arsenal américain le deuxième pilier de la nouvelle triade stratégique comprenant deux composantes conventionnelles à caractère défensif (MD) et offensif (PGS).



Figure 15 : Le missile hypersonique X-51 pourrait offrir une solution à long terme pour le programme PGS

⁹⁴ http://www.nti.org/d_newswire/issues/2006_4_19.html#480A3BE7

⁹⁵ Entre autres, l'objectif étant d'obtenir des portées plus importantes (ce qui se traduit en termes de vitesse mais également de réduction de la masse inerte). Voir par exemple <http://www.cbo.gov/ftpdoc.cfm?index=5679&type=0&sequence=4>

⁹⁶ Et en particulier, celles qui sont fortement protégées (durcies ou disposant de défenses actives), fugaces ou mobiles.

⁹⁷ B. Gruselle, « La place des frappes conventionnelles dans la stratégie américaine », op. cit., p. 1.

Plusieurs solutions techniques ont été envisagées pour répondre au besoin exprimé par l'échelon politique et réaffirmé depuis 2001 dans le cadre de la *Quadrennial Defense Review* de 2006 (QDR 2006)⁹⁸ :

- ➔ La mise au point d'un missile hypersonique : les premières études sur un engin aérobique hypersonique ont été lancées par la NASA au milieu des années 1990. Le premier engin de ce type, le X-43A, fait l'objet d'une série d'essais en vol à partir de 2004 et aurait atteint la vitesse de croisière de Mach10⁹⁹. Engagé en 2003, le programme de recherche sur le X-53 est confié à l'*Air Force Research Laboratory* (qui depuis s'est associé à Pratt&Whitney et Boeing) afin de produire un démonstrateur de missile hypersonique (volant à environ Mach 5) utilisant un statoréacteur. Un premier essai en vol de ce démonstrateur pourrait intervenir en 2008.
- ➔ L'utilisation de drones de combat (pour mémoire).
- ➔ L'utilisation de missiles balistiques : plusieurs solutions ont été envisagées pour utiliser des missiles balistiques aux fins de permettre des frappes conventionnelles rapides. La première repose sur le développement de nouvelles ogives pour les missiles Trident II-D5, *Minuteman-II* et *Peacekeeper*. Malgré les efforts déployés par les forces concernées (Air Force et Navy), les programmes lancés depuis 2003 n'ont reçu que des financements limités de la part du Congrès, les législateurs faisant état de leurs inquiétudes quant à la possibilité de voir l'emploi d'un missile stratégique armé d'une charge conventionnelle être considéré par la Russie voire la Chine comme une attaque nucléaire¹⁰⁰. Une seconde solution, lancée à partir de 2006, consisterait à développer un nouveau missile balistique, dit *Submarine Launched Intermediate Range Ballistic Missile* (SLIRBM) d'une portée d'environ 2 500 km et ayant une précision de 5 mètres¹⁰¹, à vocation navale et qui pourrait être équipé de charges conventionnelles ou nucléaires¹⁰². Dans le cadre de ce développement, Aerojet aurait été chargé de mettre au point le moteur du missile dans une perspective de minimisation des coûts de développement¹⁰³. Cette démarche correspond visiblement au fait que les budgets consacrés au programme de PGS ont été fusionnés au sein d'un projet unique de développement confié à l'*Undersecretary of Defense for Acquisition*¹⁰⁴. Ils restent toutefois relativement limités (une centaine de millions de dollars en 2007 et autant en 2008) au regard des options disponibles pour le programme.

Du fait des difficultés politiques que soulève l'utilisation de missiles balistiques – en particulier tirés de sous-marins – pour des missions conventionnelles, le Congrès continue à se montrer hésitant à financer un quelconque programme PGS fondé sur une conversion

⁹⁸ B. Gruselle, G. Payre, « La lutte contre la prolifération aux États-Unis dans la QDR 2006 : l'âge de maturité ? », Notes de la FRS, 21 mars 2006, p. 3.

⁹⁹ Noah Shachtman, « Hypersonic Cruise Missile: America's New Global Strike Weapon », *Popular Mechanics*, January 2007 issue.

¹⁰⁰ B. Gruselle, « Nouvelle triade, conventionnalisation des moyens de dissuasion et équilibres stratégiques », op. cit., pp. 21-22.

¹⁰¹ Amy F. Woolf, « Conventional Warheads for Long-Range Ballistic Missiles: Background and Issues for Congress », Congressional Research Service, CRS Report for Congress, June 19th, 2007 update, p. 23.

¹⁰² http://204.71.60.36/d_newswire/issues/2007/9/18/b7ccd831-64b2-4e8c-b5f6-6e2823a77d37.html

¹⁰³ « Aerojet tests missile booster », *Sacramento Business Journal*, November 7th, 2007.

¹⁰⁴ http://www.armscontrol.org/act/2008_01-02/hillreview.asp

d'engins existants ou même la mise au point d'un nouveau système. Alors même que le coût estimé pour la modification de 24 Trident II-D5 s'avère relativement limité (500 M\$ sur 5 ans), le développement souffre d'une double ambiguïté. Outre celle liée au déploiement sur des plates-formes à caractère stratégique, une seconde porte sur l'emploi opérationnel qui serait finalement choisi pour des missiles balistiques conventionnels. En effet, si pour l'instant le faible nombre des engins qui seraient déployés pour le PGS interdit pratiquement une utilisation opérationnelle intensive, le potentiel pour l'utilisation systématique sur des théâtres d'opération d'une telle capacité apparaît élevé¹⁰⁵.

	ANNÉE FISCALE 2003	ANNÉE FISCALE 2004	ANNÉE FISCALE 2005	ANNÉE FISCALE 2006	ANNÉE FISCALE 2007	ANNÉE FISCALE 2008	TOTAL
Air Force (CAV ¹⁰⁶)	-	17,5	21,6	27,2	33,4	0	99,7
Navy (CTM ¹⁰⁷ , SLIRBM)	0	0	10 (SLIRBM)	7,2 (SLIRBM)	20 (CTM)	0	20
Programme Commun PGS	0	0	0	0	0	100	100

TABLEAU 4 : FINANCEMENT DES PROJETS PGS EN MILLIONS DE DOLLARS (SOURCE CRS)

Au niveau politique, le concept de frappes stratégiques conventionnelles pourrait survivre au changement d'administration dans la mesure où il accompagne une diminution des capacités nucléaires américaines conforme à l'évolution de la posture stratégique du pays. La prochaine administration américaine devra répondre aux questions laissées en suspens par l'équipe précédente à la fois sur les moyens à mettre en place et sur l'emploi des outils conventionnels de ce type. En particulier, sa disponibilité éventuelle à accélérer (ou à renouer) le dialogue avec la Russie et avec la Chine sur les postures nucléaires et les dispositifs d'encadrement – voire de réduction – des moyens stratégiques (y compris, à terme, en matière de défense antimissile) pourrait faciliter un démarrage progressif de ce programme¹⁰⁸.

En ce qui concerne les retombées du projet PGS sur les motoristes américains, force est de constater qu'elles s'avèrent pour l'instant très limitées. Si l'éventuel développement et la production d'un nouveau missile permettraient d'injecter des financements dans ces entreprises, plusieurs éléments sont de nature à en limiter le volume. En premier lieu, il s'agirait sans doute de mettre au point des chargements de propergol relativement modernes, comme semblent le montrer les premiers éléments sur le SLIRBM. Par ailleurs, aucun financement n'a été mis en place pour une ligne de production à ce stade. Enfin, il existe vraisemblablement une compétition entre l'option de conversion des

¹⁰⁵ Telle que destruction de la capacité de défense aérienne d'un adversaire ou des stratégies d'anti-accès. Voir Amy F. Woolf, « Conventional Warheads for Long-Range Ballistic Missiles: Background and Issues for Congress », op. cit., p. 17.

¹⁰⁶ *Common Aero Vehicle*. Ogive conventionnelle destinée aux missiles Minuteman.

¹⁰⁷ *Conventional Trident Modification*. Modification de la partie haute du Trident II-D5.

¹⁰⁸ B. Gruselle, « Nouvelle triade, conventionnalisation des moyens de dissuasion et équilibres stratégiques », op. cit., p. 65.

missiles Trident et la mise au point de cet engin. Ce d'autant que la Marine américaine a engagé un programme de modernisation de ce missile¹⁰⁹ en parallèle de la conversion de quatre sous-marins de la classe Ohio (sur les dix-huit actuellement en service) pour des missions conventionnelles¹¹⁰. A plus long terme, l'intérêt du projet PGS pour les entreprises américaines dépendra notamment du concept de déploiement et d'emploi finalement retenu.

Du point de vue français, l'évolution de la posture américaine peut s'avérer problématique si elle conduisait Washington à réduire drastiquement la place de l'arme nucléaire en tant que socle de sa politique de sécurité. Cette option semble toutefois assez peu vraisemblable au regard de l'intérêt de ce type d'arme pour traiter de menaces massives, notamment reposant sur des armes biologiques, nucléaires ou chimiques¹¹¹.

A contrario, l'accélération du projet de PGS aux États-Unis pourrait conduire à une évolution de la perception des missiles balistiques comme uniquement porteurs de l'arme nucléaire et induire une réflexion sur leur emploi opérationnel possible (dans leur version pour frappe conventionnelle) en complément de moyens de frappe à distance (missiles de croisière). Il convient toutefois de noter que, en admettant qu'une telle réflexion soit effectivement envisagée à terme au niveau national, elle devrait prendre en compte à la fois les aspects budgétaires et doctrinaires propres à notre outil nucléaire. Sur un plan strictement technique, une telle réflexion ne peut être valable que dans la mesure où les progrès techniques réalisés – par exemple dans le cadre de la mise au point d'une version modernisée du M51 – permettent d'espérer des performances accrues en termes de portée et de précision.

En définitive, l'impact du projet de frappes conventionnelles rapides sur le développement des capacités techniques et industrielles dans le domaine des propergols solides s'avère très limité à court terme et incertain à plus longue échéance. Il dépendra, du moins aux États-Unis, à la fois de la poursuite de l'évolution conceptuelle de la posture stratégique mais également des choix techniques et opérationnels qui pourraient être effectués. La question se posera vraisemblablement de savoir dans quelle mesure la mise au point d'une composante balistique conventionnelle permet de poursuivre le développement des compétences nécessaires pour le maintien et l'amélioration des engins destinés aux forces nucléaires. Si l'on considère qu'il est vraisemblable à plus long terme que les forces stratégiques américaines comprennent une composante offensive conventionnelle, les motoristes américains devraient obtenir à la fois des financements de production – dont le volume dépendrait particulièrement de la fréquence d'emploi¹¹² – et des budgets destinés au développement de nouveaux chargements.

¹⁰⁹ Le programme de modernisation du Trident II-D5 comprend à la fois le CTM, le financement du maintien en conditions opérationnelles et l'extension de la durée de vie du missile. Le budget total requis pour l'année 2008 s'élève à 1,2 milliard de dollars. http://www.armscontrolcenter.org/policy/nonproliferation/articles/analysis_c110_hr_1585/#_edn19

¹¹⁰ Dont le lancement de missiles de croisière ou l'insertion de forces spéciales.

¹¹¹ B. Tertrais, « La dissuasion nucléaire en 2030 », Essai de prospective, FRS, décembre 2006.

¹¹² Encore une fois selon qu'il s'agit d'armes ayant vocation à n'être employées que ponctuellement ou sur une base plus systématique.

2.2 – *Évaluation des besoins français futurs en propulsion à vocation stratégique*

Le besoin en matière d'engins propulsés à caractère stratégique (missiles balistiques et intercepteurs) répond plus ou moins directement à l'évolution de notre environnement international. Si l'on considère un horizon assez lointain, qui est celui correspondant à un éventuel renouvellement de nos forces nucléaires (au-delà de la décennie 2030), plusieurs évolutions du contexte de sécurité sont susceptibles de se faire jour :

- ➔ Le renforcement des capacités nucléaires russes autour d'un arsenal plus moderne, plus ramassé mais quantitativement stable par rapport à la période de baisse des années 1990¹¹³. La Russie a effectivement engagé depuis le début de la décennie un programme visant à réorganiser ses forces nucléaires (tactiques et stratégiques), devenues l'un des éléments centraux de sa politique de sécurité, y compris en matière de conflits conventionnels¹¹⁴. Même s'il apparaît peu probable que la relation entre l'Europe (et la France en particulier) et la Russie s'envenime au point de revenir à la situation de la Guerre froide, nous devons prendre en compte l'existence d'un arsenal russe dans la définition de nos besoins.
- ➔ L'évolution de l'arsenal chinois et la révision des doctrines associées. Pékin mène pour l'instant un effort de modernisation de ses capacités balistiques portant notamment sur la navalisation des missiles stratégiques. Il s'agit pour la Chine de renforcer la crédibilité de son concept de « frappe en second en riposte à une attaque nucléaire »¹¹⁵. Si cette doctrine demeure à l'heure actuelle le socle du concept de sécurité chinois, l'évolution des moyens stratégiques américains (la nouvelle triade) pourrait contribuer à une modification de posture. Des réflexions allant vers la possible utilisation des moyens nucléaires en cas de détection d'une attaque contre les intérêts chinois semblent du reste prendre place au sein de la communauté militaire chinoise¹¹⁶.
- ➔ L'apparition de nouvelles puissances balistiques (disposant éventuellement de capacités nucléaires et/ou non conventionnelles), peut-être hostiles à l'Occident, ne peut être écartée. Les efforts iraniens, qui viseraient à posséder des engins de portée suffisante pour atteindre les grandes capitales européennes suggèrent l'existence d'une dynamique de développement des moyens balistiques tout comme la poursuite par Islamabad d'un programme de mise au point de missiles balistiques destinés à l'emport de l'arme nucléaire. Cette dynamique peut se poursuivre même si les pays concernés renoncent à l'acquisition ou au développement d'armes non conventionnelles pour équiper leurs missiles.

¹¹³ Avec 1 000 à 1 500 têtes nucléaires stratégiques.

¹¹⁴ Yury E. Fedorov, « Russia's Strategic Forces: Policy, Evolution and Prospects », Proliferation Papers, Summer 2005, p. 9.

¹¹⁵ Conformément au livre blanc de 2006. « China's National Defense in 2006 », Chapter II, National Defense Policy, document qui peut être trouvé en version anglaise à l'adresse : <http://english.pladaily.com.cn/site2/special-reports/2007gfbps/index.htm>

¹¹⁶ B. Roberts, « China and Ballistic Missile Defense: 1955 to 2002 and beyond », Proliferation Papers, Winter 2004, p. 42. Voir également, « China rethinks no-first use of nuclear weapons: Policy "not unlimited, without conditions" », East Asia Intel, January 30th, 2008.

Même si toutes ces menaces ne se matérialisent pas (ou décroissent) à l'horizon considéré, elles offrent toutefois des perspectives quant aux besoins qui pourraient être exprimés par nos autorités politiques (ainsi que par les utilisateurs) dans le domaine des missiles balistiques voire, éventuellement, des intercepteurs antimissiles :

- ➔ Flexibilité d'emploi : face à une menace plus répartie géographiquement, les missiles dont nous disposerons doivent pouvoir atteindre des zones reculées. Cette exigence se traduit directement en termes de portée à atteindre. En la matière, les performances requises doivent sensiblement évoluer par rapport à la situation actuelle. De la même façon, le déploiement sur sous-marin restera une exigence pour permettre de riposter à une attaque contre nos intérêts vitaux en toutes circonstances et en offrant un moyen de déploiement discret et flexible.
- ➔ Amélioration de la précision de la charge : pour répondre, par exemple, à une volonté de pouvoir détruire des cibles spécifiques en limitant les dégâts occasionnés dans son environnement. Il peut s'agir également d'amener une charge utile de type « *kill vehicle* » dans une zone de l'espace très précise pour permettre l'engagement d'un missile adverse.
- ➔ Accroissement des durées de vie et de la fiabilité des chargements : dans la mesure où ces caractéristiques peuvent être améliorées, il s'agit essentiellement de garantir le fonctionnement nominal des propergols solides pendant des durées plus importantes. Le maintien d'un niveau de sûreté équivalent à celui existant actuellement voire son amélioration doivent également être envisagés afin de réduire encore le risque d'incident, en particulier pour les déploiements océaniques.

Ainsi, il apparaît que la tendance générale d'évolution du besoin en matière de missiles balistiques à un horizon temporel lointain se traduit par la nécessité de mettre au point et de produire des chargements à propergol solide qui seraient plus performants que ceux existants aujourd'hui. Ce constat amène à considérer que la conservation et l'amélioration de nos compétences nationales dans les domaines techniques clefs de la conception et de la réalisation de missiles – en particulier pour ce qui concerne la propulsion solide stratégique – constituent une priorité afin de garantir l'avenir de notre politique de sécurité. Qui plus est, il est essentiel que nous conservions dans ces domaines la capacité de réaliser des systèmes de façon indépendante.

2.3 – Entretien et accroissement du socle de compétences

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la capacité à mettre au point et à produire des chargements de propergols solides adaptés à des emplois stratégiques, qu'il s'agisse de moteurs très compacts mais offrant des performances énergétiques élevées – pour le lancement depuis des plates-formes navales – ou de propergols composites permettant d'atteindre des niveaux d'accélération et de vitesse compatibles avec la mission de défense antimissiles, résulte d'un investissement technique et humain de longue durée.

Si le programme M-51 et les efforts de développement destinés à permettre sa modernisation aux environs de 2015 ont permis à l'industrie française des moteurs à propergols composites de maintenir et d'accroître ses savoir-faire jusqu'à aujourd'hui, il convient de s'interroger sur le devenir à court terme de notre capacité dans le domaine, en l'absence

de nouveaux programmes. Cette problématique est d'autant plus pertinente que plusieurs défis techniques, politiques ou opérationnels devront être relevés dans l'avenir :

- ➔ La maintenance des missiles déployés : la durée de vie objectif pour les missiles qui entreront en service à partir de 2010¹¹⁷ serait vraisemblablement d'une vingtaine d'années. Pendant cette période, il est essentiel d'être en mesure de vérifier la bonne tenue mécanique du chargement et de pouvoir réagir rapidement en cas de défaillance ou d'accident en disposant de l'expertise et des moyens permettant d'analyser et de résoudre le problème. De la même façon, le retrait du service des missiles en fin de vie opérationnelle doit être pris en compte en cohérence avec les contraintes environnementales qui pèsent sur la destruction des chargements.
- ➔ La mise au point de nouveaux systèmes : outre le remplacement éventuel des missiles balistiques de la force nucléaire française, l'émergence de nouveaux systèmes destinés à la défense du territoire ou à l'action stratégique et nécessitant l'existence d'un savoir-faire industriel et technique dans le domaine des propergols solides mérite d'être pris en compte. Comme nous l'avons vu précédemment, le développement d'une capacité de défense antimissile de l'Alliance atlantique fait partie des scénarios vraisemblables dans le cadre de l'évolution du concept stratégique américain. Or, nous sommes les seuls partenaires européens disposant de l'ensemble des capacités technologiques adéquates pour juger de la pertinence des solutions proposées en matière d'intercepteurs et, le cas échéant, pour participer dans le domaine de la propulsion solide à un programme transatlantique. Toutefois, si l'on en juge par les programmes connus (ACCS par exemple¹¹⁸), un programme de développement de l'OTAN s'avère être un processus lent dans lequel les financements n'interviennent que tardivement. Dès lors, il est impératif afin de prétendre à une place d'interlocuteur européen crédible de pouvoir continuer à s'appuyer sur un niveau de compétence industrielle élevé à long terme.

Plusieurs éléments de contexte doivent être pris en compte dans la gestion de cette problématique :

- ➔ Le premier est d'ordre budgétaire : dans la perspective d'une poursuite de la diminution des financements consacrés à la Défense, qui se traduit d'ores et déjà par une rupture du cycle production-développement à la fois pour la composante stratégique et spatiale¹¹⁹, la question devra être abordée dans une logique de hiérarchisation des compétences allant des plus critiques pour notre sécurité à celles ayant un rôle marginal.
- ➔ Le deuxième concerne l'approche future de nos responsables politiques vis-à-vis de l'outil de dissuasion et, par conséquent des missiles balistiques. Comme le souligne Bruno Tertrais, « *les nouvelles générations politiques sont moins enclines que les précédentes à voir dans l'outil de dissuasion nucléaire un instrument indispensable à la sécurité nationale* »¹²⁰. De fait, si le rôle central de la dissuasion nucléaire pour

¹¹⁷ http://www.defense.gouv.fr/dga/missile_balistique_m51

¹¹⁸ Conçu à la fin des années 1970, le premier contrat pour la mise au point du système de commandement et de contrôle aérien date de 1999. <http://www.nato.int/issues/accs/index.html>

¹¹⁹ Fin du développement du M-51 et d'Ariane 5 et absence de programme futur tant pour les missiles balistiques que pour les lanceurs. Voir la figure 15 qui illustre le recoupement qui a existé jusqu'au M-51 entre les cycles de développement et de production des missiles balistiques stratégiques.

¹²⁰ B. Tertrais, « La dissuasion nucléaire en 2030 », op. cit., p. 41.

la sécurité de nos intérêts vitaux ne semble pas devoir être remis en jeu, la structure qualitative et quantitative actuelle de nos arsenaux pourrait faire l'objet de débats périodiques (par exemple à chaque élection présidentielle). Du point de vue des vecteurs, les révisions stratégiques pourraient se traduire par des demandes de performances accrues en termes de portée et de précision s'inscrivant dans une logique d'évolution des charges nucléaires¹²¹.

- ➔ Enfin, elle doit prendre en compte la perspective d'un vieillissement des équipes techniques qui ont mené les développements des années 1970, 1980 et 1990. Les personnels qui ont participé à l'ensemble des projets (depuis le M4) et qui possèdent l'expérience et les compétences clefs au lancement éventuel d'un nouveau programme mais également à la formation de nouveaux personnels, appartiennent à la génération qui devrait partir en retraite au cours de la décennie. Par ailleurs, la génération suivante, même si elle a participé en partie au programme M-51, se trouve face à la perspective de l'absence de nouveaux développements¹²². Cette double tendance pèse fortement sur la capacité des entreprises à renouveler le capital humain dont elles disposent actuellement.

Ainsi intégré dans un contexte politique, industriel et budgétaire difficile, le maintien de nos capacités à concevoir (et à entretenir) des chargements de propergols solides, qui pourraient être au moins aussi performants (donc complexes) que ceux dont dispose actuellement notre force stratégique, doit probablement s'appuyer sur de nouvelles activités. Il convient également de définir comment les synergies qui existent entre les branches de propulsion spatiale, tactique et stratégique peuvent être exploitées au mieux pour faciliter la conservation et le développement des compétences nationales.

En outre, le besoin en termes de formation et d'attraction des jeunes professionnels passe par l'existence d'un programme de développement permettant de bâtir une expérience dans certains domaines clefs (sécurité pyrotechnique, ingénierie, matériaux, procédés de fabrication, technologies de mise en forme des chargements, production y compris matières premières)¹²³. En effet, à la différence de certains domaines, il existe pour les propergols solides de grandes dimensions un lien étroit entre les compétences techniques et théoriques et l'expérience pratique que seule la mise au point de chargements de taille réelle permet de nourrir. Pour ce qui est du domaine spécifique des missiles, la reprise d'une activité de production après un arrêt peut s'avérer d'autant plus complexe que le besoin en performances sera élevé.

¹²¹ Qui traduirait une évolution d'une planification anti-démographique à la possibilité de menacer des objectifs politiques ciblés (chef d'État par exemple). B. Tertrais, « La dissuasion nucléaire en 2030 », op. cit., pp. 39-40. Si l'on exclut l'aspect nucléaire, une telle évolution est comparable à celle recherchée par la mise en place des PGS.

¹²² En particulier la mise au point de démonstrateurs reflétant parfaitement les problèmes techniques rencontrés pour des systèmes réels. Entretiens de l'auteur, janvier 2008.

¹²³ Entretiens de l'auteur, janvier 2008.

		1960-1965	1965-70	1970-75	1975-80	1980-85	1985-90	1990-95	1995-2000	2000-05	2005-10	2010-15	2015+		
G E N E R A T I O N S	SI-S3	<u>901</u>	Développement 1963-67												
			Production 1965-68												
		<u>902</u>	Dév 1965-1976												
			Production 1970-1993												
		<u>903</u>	Dév.1963-1976												
			Production 1970-1977												
	MI-M20	<u>904</u>	Dév. 1963-1976												
			Production 1970-1989												
		<u>RITA1</u>	Dév. 1963-1969												
Prod. 1970-1973															
<u>RITA2</u>		Dév. 1969-1976													
		Production 1972-1993													
M4(M45)	<u>401</u>	Dév. 1974-1984													
		Production 1977-2003													
	<u>402</u>	Dév. 1974-1984													
		Production 1977-2005													
	<u>403</u>	Dév. 76-84													
		Production 1978-2006													

<i>M4(M45)</i>	<u>404</u>	Dév. 76-84	
		Production 1978-2006	
<i>S45</i>	<u>701</u>	Dév. 88-91	
		Pas de production – développements exploratoires M-51	
	<u>702</u>	Dév. 88-91	
		Pas de production – développements exploratoires M-51	
<i>M51</i>	<u>511</u>	Dév. 1992-2008	
	<u>512</u>	Dév. 1994-2008	
	<u>413</u>	Dév. 1998-2008	
	<u>514</u>	Dév. 1998-2008	

Figure 16 : Historique du développement et de la production des propulseurs pour les missiles balistiques stratégiques

NB : Il convient de noter que les développements M4 (S45) ont duré jusqu'en 1984. Par la suite des développements exploratoires ont fait la liaison avec le développement M51

Le maintien d'une activité dans les secteurs spatiaux et de la propulsion tactique semblerait à première vue être de nature à faciliter une éventuelle reprise de développement dans le domaine de la propulsion stratégique. Mais plusieurs éléments à la fois techniques et industriels limitent en réalité la validité d'un tel raisonnement :

- ➔ D'un point de vue technique, les besoins en propulsion dans la branche stratégique ne sont pas les mêmes que pour les deux autres secteurs même s'il existe des synergies technologiques et, partiellement, industrielles qui justifient un rapprochement des activités. Par rapport à la propulsion tactique, même si les compositions et le besoin de compacité¹²⁴ peuvent être identiques, les dimensions des chargements à caractère stratégique sont bien plus importantes, ce qui influe immédiatement sur les outils de conception et de fabrication nécessaires, sur les processus industriels et indirectement sur la compétence des équipes à concevoir des chargements de plus grandes tailles. En particulier, avec un arrêt des activités de développement, il paraît vraisemblable que l'expérience en matière de simulation et d'essai s'évapore rapidement. *A priori*, la poursuite de l'activité dans le secteur spatial paraît plus susceptible d'alimenter si nécessaire un programme de missiles balistiques. Toutefois, même si l'activité spatiale se maintenait, elle ne permettrait sans doute à terme que la production de chargements répondant à des spécifications différentes, notamment en termes de compacité et de vieillissement des propergols. Tout dépendrait donc du besoin exprimé sur les performances du missile en termes de portée ou encore de charge utile emportée, sur les dimensions, et par conséquent sur le type de plateforme de lancement retenue¹²⁵, et sur la durée de vie du chargement. En outre, il est vraisemblable que l'absence d'expérience de développement entretenue amène à un accroissement des coûts et de la durée d'un éventuel projet.
- ➔ L'industrie européenne de la propulsion spatiale fait l'objet d'un partage de responsabilité, pour l'essentiel, entre la France et l'Italie¹²⁶, cette dernière se montrant très entreprenante sur la conception et la production des chargements et au-delà. De fait, ce partage se traduit également par un transfert de compétences vers l'Italie, aujourd'hui co-maître d'œuvre des MPS d'Ariane 5 et maître d'œuvre du programme de lanceur VEGA. En l'absence du développement d'un nouveau lanceur, la question se pose de savoir si la France pourra conserver seule le niveau adéquat pour être capable de concevoir et de produire indépendamment, à un horizon de 15 à 20 ans, un chargement de grande dimension qui pourrait être utilisé pour un futur missile balistique.

In fine, il apparaît que les perspectives à 20 ans concernant le maintien des capacités industrielles et techniques françaises en matière de propulsion solide composite à vocation stratégique sont fortement limitées du fait de l'absence de programmes de développement dans les domaines spatiaux et de la propulsion de missiles. Le risque d'une disparition progressive de nos savoir-faire, causée par la concordance entre la disparition de la génération de personnels qui a mené les programmes M-4, M-45, M-51 et celle des moteurs à propergols solides (MPS) d'Ariane 5 et l'absence d'attractivité du secteur pour les jeunes professionnels, est très fort. Il en résulterait une incapacité à

¹²⁴ On entend ici le rapport entre les dimensions et les performances énergétiques obtenues.

¹²⁵ Un lancement depuis un sous-marin devrait donc être, du moins dans un premier temps, exclu.

¹²⁶ Au sein de Regulus et d'Europropulsion.

développer indépendamment, rapidement et en contrôlant les coûts de nouveaux systèmes mais également à entretenir et à retirer du service ceux déjà déployés.

Il paraît donc nécessaire de mettre en place des mesures qui pourraient être susceptibles de garantir l'indépendance de la filière nationale dans le domaine de la propulsion stratégique. Il convient de souligner qu'à la lumière des éléments évoqués précédemment, cette filière devra permettre à la fois de conduire des activités de développement mais également des travaux de production, *a minima* sur des démonstrateurs en grandeur réelle.

Compte tenu des éléments que nous avons pu rassembler dans les parties précédentes, tout porte à penser que c'est dans le domaine de la défense antimissile – en particulier, des chargements destinés à des intercepteurs exoatmosphériques ou haut endoatmosphériques – qu'un investissement national serait le plus efficace. En effet, un tel effort aurait plusieurs intérêts objectifs :

- ➔ Les développements que nous pourrions engager sont susceptibles de renforcer notre position nationale, à terme, si un consensus se dégagait au niveau de l'OTAN pour le développement d'une composante européenne de la défense antimissile. La mise en place d'une capacité nationale nous permettrait notamment de proposer une participation industrielle européenne à un éventuel programme transatlantique destiné à répondre à ce besoin. En matière d'intercepteurs, il est possible d'envisager une contribution européenne soit sous la forme du développement en propre d'un engin, soit sous la forme d'un programme en commun avec les États-Unis. Dans ce dernier cas, nous pourrions en particulier chercher à obtenir la charge de la mise au point de l'un des étages propulsifs.
- ➔ Les chargements envisagés ont un caractère techniquement proche de celui de propergols solides destinés à des applications offensives : dimensions, performances énergétiques, fiabilité et durée de vie. Les efforts engagés pourraient donc efficacement permettre d'accroître des compétences nécessaires à l'évolution éventuelle et au maintien en condition de nos capacités stratégiques nucléaires.

Si l'on prend comme élément de comparaison les financements consacrés par les États-Unis, dans le cadre du programme KEI, au développement d'un démonstrateur de chargement à propergol solide de nouvelle génération, l'investissement annuel à réaliser se situerait autour de 150 millions d'euros sur 10 à 15 ans.

Une telle initiative, portée par la puissance publique, devrait en particulier poursuivre plusieurs objectifs clefs :

- ➔ Bâtir une nouvelle génération de personnels aptes à concevoir, développer et produire des chargements de propergols solides complexes et former la génération suivante.
- ➔ Mettre au point de nouveaux matériaux (énergétiques et de structure) destinés à nos capacités stratégiques futures. Poursuivre la modernisation des outils et des processus de recherche et de production permettant de diminuer les coûts et les délais de développement de nouveaux propergols solides.
- ➔ Garantir l'accès aux matières premières clefs destinées à la production et développer la synthèse des molécules énergétiques du futur. Il convient de souligner que la France produit – et transforme pour des applications militaires ou spatiales – pour l'essentiel les matières premières nécessaires à ses programmes. Une rupture des travaux de développement et de production conduirait probablement à réduire égale-

ment cette activité, voire à y renoncer, rendant d'autant plus difficile l'éventuelle reprise d'un projet.

Si, pour des raisons politiques ou budgétaires, un tel projet ne pouvait pas être poursuivi, une autre possibilité pourrait être d'engager un programme de développement d'un démonstrateur de missile balistique futur. Il s'agirait, fondé sur une analyse prospective de l'évolution de nos besoins et de nos concepts, de mettre au point un engin utilisant des chargements de propergol solide soit de nouvelle génération, soit du type butalaneTM mais ayant des performances accrues. L'équation budgétaire serait vraisemblablement déterminante pour effectuer les choix de technologies à utiliser et, en tout état de cause, elle amènera également à déterminer précisément quelles activités ou domaines de compétences doivent être conservés (et lesquels doivent être abandonnés). Si l'on peut envisager que cette solution soit financièrement moins lourde que la précédente, elle exige néanmoins de maintenir un effort budgétaire sur une période relativement longue. *A priori*, si l'on estime la durée de vie des systèmes en cours de déploiement à une vingtaine d'années et qu'un projet de démonstrateur est lancé dans la période 2010-2015, le programme devrait de façon réaliste être maintenu jusqu'à 2025-2030 afin de permettre *a minima* de conserver la compétence nécessaire pour remplacer (et expertiser si nécessaire) à cet horizon les parties propulsives des missiles existants.

Notre participation aux programmes spatiaux européens, comme contribution potentielle à une reprise d'activité dans le secteur stratégique, représente, à la lumière des éléments détaillés précédemment, la solution la moins attractive pour répondre à la question de la conservation des compétences. Néanmoins, elle permettrait théoriquement d'entretenir un niveau de savoir-faire suffisant pour concevoir des chargements rustiques destinés à des applications stratégiques, à condition que nous conservions une maîtrise propre du développement et de la production des propergols, ce qui est loin d'être assuré étant donnée la position de l'Italie dans ce secteur d'activité. La mise en place d'un programme de développement pour un lanceur national à propulsion solide rustique (c'est-à-dire utilisant des technologies éprouvées)¹²⁷ pourrait par exemple être envisagée afin de conserver la maîtrise d'œuvre de l'ensemble du système, de la conception à la fabrication. Comme dans le cas du développement d'un démonstrateur de missile balistique futur, si l'effort financier serait sans doute limité en termes d'investissement annuel, il devrait toutefois être maintenu sur une période de temps assez longue pour pouvoir faire la jonction entre la livraison des M-51 et leur remplacement éventuel au-delà de 2030.

Le maintien de la seule activité de recherche, au sein du Centre de Recherche du Bouchet (CRB), peut apparaître à première vue comme la solution la plus économique et donc, dans un contexte budgétaire difficile, la plus attractive. Elle permet effectivement, en théorie, de conserver une compétence nationale dans certains domaines clefs et donc, à terme, d'espérer pouvoir entreprendre de nouveaux programmes si le besoin était exprimé par les responsables politiques. De la même façon, elle pourrait contribuer à la formation d'une nouvelle génération de personnels techniques indispensables pour conduire un tel effort. Toutefois, malgré ces mérites, cette option minimaliste ne prend pas en compte les aspects pratiques du développement de chargements de propergols

¹²⁷ Un lanceur ayant une capacité d'emport de quelques tonnes mais avec un faible coût de développement et de fabrication pourrait par exemple s'insérer dans le marché du lancement spatial.

solides de grandes dimensions. Elle conduirait vraisemblablement à la disparition du savoir-faire, qui a été obtenu grâce à la résolution de problèmes réels, dans certains secteurs clefs :

- ➔ Sécurité pyrotechnique : l'histoire montre que les progrès réalisés dans la définition des méthodes de production et de la sécurité des chargements durant leur vie opérationnelle n'ont pu l'être que grâce à l'identification, puis l'analyse d'incidents réels et le développement de moyens d'essai spécifiques capables de reproduire les conditions de ces événements¹²⁸. Avec la mise en service de nouvelles compositions, des problèmes spécifiques, qui ne sont pas connus à l'heure actuelle, peuvent apparaître, dont la résolution sera d'autant plus difficile (et donc coûteuse) que l'expérience pratique sera limitée.
- ➔ Processus et méthodes de fabrication : une partie de l'amélioration des performances des chargements de propergols solides, de leur durée de vie ainsi que de leur comportement mécanique ou de leur fiabilité, a été obtenue grâce aux progrès des méthodes employées pour fabriquer les compositions. Ceux-ci proviennent directement de l'expérience acquise au cours des phases de production, comme c'est le cas par exemple pour l'amélioration des coulées ou de la densité du chargement solide. La mise au point d'outils de simulation ne peut du reste être obtenue que grâce à l'expérience sur des compositions ayant les dimensions réelles de chargements.

Ainsi, l'option du seul maintien d'une activité nationale de recherche dans le domaine des matériaux énergétiques semble permettre de sauvegarder la connaissance théorique des formulations et de poursuivre les travaux sur des compositions futures. Elle est par conséquent indispensable pour conserver le socle scientifique essentiel à une capacité nationale dans le domaine des propergols solides. Toutefois, elle s'accompagne irrémédiablement d'une perte progressive de l'expérience pratique acquise grâce aux programmes existants depuis les années 1960, c'est-à-dire depuis un demi-siècle. Ce phénomène aurait pour conséquence d'accroître de façon substantielle les budgets et les délais nécessaires à une éventuelle reprise d'activité industrielle en grandeur réelle.

¹²⁸ A. Davenas, « History of the Development of Solid Rocket Propellant in France », *Journal of Propulsion and Power*, Vol.11, N°2, March-April 1995, p. 288.

	DÉMONSTRATEUR D'INTERCEPTEUR EXO/HAUT-ENDO	DÉMONSTRATEUR MISSILE BALISTIQUE FUTUR	DÉMONSTRATEUR LANCEUR BAS-COÛT À PROPERGOL SOLIDE	MAINTIEN DE L'ACTIVITÉ DE RECHERCHE ET TECHNOLOGIE
Financement (type, durée, niveau)	⇒ Financement par l'OTAN possible ⇒ 20 ans	⇒ Financement national ⇒ 25 ans+	⇒ Financement européen possible ⇒ 25 ans+	⇒ Financement national ⇒ 25 ans+
Efficacité	⇒ Maintien des compétences pour le développement et la production d'un chargement futur ⇒ Entretien/remplacement/expertise possible des chargements existants ⇒ Destruction des chargements retirés du service	⇒ Maintien des compétences pour le développement et la production d'un chargement futur ⇒ Entretien/remplacement/expertise possible des chargements existants ⇒ Destruction des chargements retirés du service	⇒ Maintien des compétences pour le développement et la production d'un chargement rustique ⇒ Expertise partielle des chargements existants	⇒ Maintien des compétences théoriques uniquement ⇒ Capacité d'expertise de chargement en service limitée
Reprise d'un programme	⇒ Tout type de programme ⇒ Réponse à des besoins accrus (portée, charge utile, durée de vie/fiabilité) ⇒ Coût limité	⇒ Tout type de programme ⇒ Réponse à des besoins accrus (portée, charge utile, durée de vie/fiabilité) ⇒ Coût limité	⇒ Missile balistique rustique uniquement (intégration sur lanceur complexe (e.g. sous-marin) difficile) ⇒ Pas de réponse à des besoins accrus ⇒ Coût limité	⇒ Développement d'un missile balistique rustique possible ⇒ Pas de réponse à des besoins accrus ⇒ Coût de développement et production augmenté

TABEAU 5 : SYNTHÈSE DES SOLUTIONS ENVISAGÉES

Quelle(s) que soi(en)t la ou les solutions qui pourraient être retenues, un autre défi doit être relevé dans l'hypothèse où nous envisagerions de lancer un programme de missile destiné à succéder au M-51 à un horizon de 20 à 30 ans. En effet, l'indépendance de notre filière nationale repose, non seulement sur les savoir-faire techniques touchant à la conception et à la production des chargements de propergols solides, mais également à l'accès sans restriction aux matières premières essentielles à la fabrication. La France possède, en particulier, une capacité unique de production de perchlorate d'ammonium (située à Toulouse) qu'il est essentiel de conserver sur le long terme¹²⁹. Une partie de la production – qui s'élève à environ 3 000 tonnes par an à l'heure actuelle¹³⁰ – devrait continuer à alimenter les filières spatiales et tactiques mais une diminution est à prévoir dans l'hypothèse d'une disparition des programmes stratégiques. De la même façon, celle-ci pourrait conduire à un abandon progressif des capacités de transformations des matières premières (e.g. broyage du perchlorate d'ammonium pour l'obtention de granulométries spécifiques). Il convient également de noter que les activités de mise au point et de fabrication d'additifs répondant à des besoins spécifiques¹³¹ – notamment l'adaptation de la loi de poussée pour obtenir des trajectoires données – pourraient

¹²⁹ Les moyens et les savoir-faire permettant de transformer ces matières premières pour répondre aux besoins de production sont tout autant stratégiques.

¹³⁰ Entretiens de l'auteur, janvier 2008.

¹³¹ A. Davenas, « History of the Development of Solid Rocket Propellant in France », op. cit., p. 288.

également être remises en cause par une rupture du cycle de développement-production de nouveaux chargements à propergols solides à vocation stratégique. Toutefois, la poursuite de programmes nationaux de missiles tactiques ou de lanceurs paraît susceptible de maintenir un niveau d'activité économique suffisant pour conserver une partie des capacités de production.

Plusieurs pistes peuvent donc être poursuivies pour permettre la sauvegarde du pôle industriel et technique français de la propulsion par propergol solide. Les solutions les plus efficaces nécessitent toutefois de maintenir pendant plusieurs années un effort budgétaire important destiné à financer la mise au point de démonstrateurs d'engins à l'échelle réelle. Si ce choix était retenu, il serait sans doute plus efficace techniquement de se concentrer soit sur des intercepteurs destinés à une défense antimissile de zone (donc exoatmosphériques ou haut endoatmosphériques), soit sur la conception d'une nouvelle génération de missiles balistiques répondant à l'évolution de notre environnement de sécurité. Des choix plus économiques, comme un investissement limité au secteur de la recherche, sont envisageables mais ils risquent d'obérer notre capacité à la fois à assurer la maintenance des chargements existants et, le cas échéant, à développer de nouveaux propergols solides adaptés à des applications stratégiques. Enfin, le maintien de notre indépendance technique et industrielle passe par la conservation des pôles de compétences mais également par le maintien de nos filières de production et de transformation de matières premières.

Conclusions

Depuis les développements des premiers propergols solides composites, dans les années 1950, la France et les États-Unis se sont imposés comme les deux pays les plus avancés dans ce domaine, disposant à présent des compétences et du savoir-faire pour mettre au point des chargements très performants destinés à leurs forces stratégiques respectives. La maîtrise dans ce domaine a pu être acquise grâce à l'établissement d'une dynamique entre les efforts de recherche, le développement et la production de systèmes. Celle-ci a en particulier permis de créer de nouveaux outils (simulation) et des processus industriels innovants contribuant à réduire considérablement les coûts et les durées des programmes. Les autres puissances balistiques, comme la Russie, la Chine et dans une moindre mesure l'Inde, n'ont engagé des développements à vocation opérationnelle que plus tardivement et disposent d'une expérience moindre des aspects industriels et techniques. Enfin, certains États, comme le Pakistan ou l'Iran, poursuivent des travaux dans le domaine mais leurs programmes dépendent de l'accès à une source extérieure de technologie et de matières premières pour progresser.

Par ailleurs, force est de constater que les choix de ces derniers en matière de propulsion correspondent davantage à la possibilité d'accéder à une source externe de matériels ou de technologies qu'à un effort pour répondre à des besoins opérationnels ou stratégiques par des développements spécifiques. Ainsi, la décision de mise au point de moteurs à ergols liquides dérivés de celui du SCUD par l'Iran ou la Corée du Nord – donc le choix de la filière liquide pour leurs capacités stratégiques – résulte de l'acquisition de missiles de ce type. Toutefois, l'exemple chinois montre également que des pays ayant initialement bénéficié d'une aide extérieure pour le développement de leurs moyens balistiques peuvent parvenir à une forme d'autonomie technique dans une filière de propulsion différente (passage du liquide au solide) à condition d'être en mesure d'y allouer des ressources importantes sur une longue période.

La coïncidence de la fin des programmes de développements de missiles balistiques et de lanceurs spatiaux crée en France une situation exceptionnelle de vulnérabilité pour la filière des propergols solides. En effet, une fois achevé le développement du M-51, aucun effort de recherche et de développement de longue durée n'a été encore planifié pour permettre de sauvegarder les savoir-faire critiques qui permettraient de lancer à l'horizon 2030 un nouveau programme de vecteurs destinés à notre force stratégique. Or, les besoins en performance qui sont susceptibles d'être exprimés dans le futur – augmentation de la portée, conservation de la flexibilité offerte par la composante océanique, accroissement de la précision et fiabilité des missiles – ne pourront être comblés que par des propergols solides performants en termes mécaniques et de compacité énergétique. La mise au point de tels chargements nécessite non seulement la conservation mais également l'accroissement du savoir-faire dont dispose aujourd'hui notre tissu industriel. Par ailleurs, le départ prochain de la génération de personnels qui a participé aux programmes M-45 et M-51 menace d'aggraver le risque de perte de compétence en l'absence d'un nouveau projet susceptible de faciliter le transfert de savoir-faire vers les jeunes professionnels.

Toutes les options visant à préserver la filière des propergols solides à caractère stratégique exigent toutefois un investissement sur plusieurs années pour être efficaces et doivent reposer plutôt sur le développement de démonstrateurs que sur le financement de projets de recherche. En outre, il serait sans doute plus judicieux de travailler sur des projets balistiques ou antibalistiques plutôt que sur un programme de lanceur du fait de la nature vraisemblable des besoins futurs.

Du côté américain, les projets d'intercepteurs de génération future lancés dans le cadre du programme de *Missile Defense* offrent aux deux motoristes ATK et Aerojet des perspectives de financements de leurs capacités industrielles et de développement. De la même façon, le projet de frappes globales rapides (*Prompt Global Strike* – PGS), même s'il n'est aujourd'hui que faiblement financé, est susceptible de soutenir la mise au point de nouveaux chargements de propergols solides. Or, ces deux programmes, même s'ils sont susceptibles de faire l'objet d'évolutions après les élections présidentielles de 2009, devraient être poursuivis dans la mesure où ils répondent à une évolution de fond de la réflexion américaine sur son concept de sécurité.

A terme, la prochaine administration américaine pourrait chercher à répondre aux critiques concernant l'extension de la défense antimissile à l'Europe en remettant l'Alliance atlantique au cœur d'un projet commun de développement et de déploiement de moyens antimissiles. Moscou pourrait être invité à participer plus ou moins directement au projet, *a minima* en tant qu'observateur et éventuellement de contributeur. Ce scénario pourrait ouvrir la porte à un projet de coopération transatlantique sur la défense antimissile dans lequel la France pourrait faire valoir, notamment, ses compétences industrielles et techniques uniques dans le domaine de la propulsion solide à caractère stratégique.

En l'absence d'investissements nationaux dans ce domaine, il paraît toutefois assez peu vraisemblable que Washington envisage de partager la responsabilité du développement de chargements de propergols solides. En effet, la disparition de la compétence française mettrait les États-Unis en position de monopole à la fois sur le développement et la fabrication de propergols composites modernes. De la même façon que la dissuasion britannique dépend des fournitures américaines pour les vecteurs qui l'équipent, nous nous trouverions face au choix de demander aux États-Unis de nous fournir des missiles complets ou de reprendre seuls un programme de mise au point de chargements à propergols solides. Cette dernière option s'avérerait vraisemblablement à la fois coûteuse et longue à mettre en place la rendant assez impraticable dans un cadre budgétaire national contraint.

Enfin, il convient de souligner que si, pour préserver notre outil industriel, nous choisissons de réinvestir le domaine de la propulsion spatiale pour de futurs lanceurs, nous serions confrontés à l'existence en Europe d'une forte concurrence italienne. Ainsi, il paraît peu probable que cette solution puisse être financée par un programme européen et exigerait par conséquent un budget national pour fonctionner. Dès lors, il conviendrait sans doute de préférer à cette option, à coût financier équivalent, des travaux de développement sur les propergols destinés à un futur missile stratégique français.

La filière française de la propulsion solide à vocation stratégique se trouve aujourd'hui dans une situation exceptionnelle qu'elle n'a jamais connue depuis sa mise en place à la fin des années 1950. Celle-ci est caractérisée par une rupture du cycle de développement-production qui, jusqu'ici, avait permis de conserver et d'accroître son potentiel technique et

scientifique, avec pour conséquence l'amélioration des performances des chargements et de leur fiabilité. La fin de la période de production des moteurs du missile M-51 pourrait conduire à la disparition progressive de compétences spécifiques et uniques qui ne pourront réapparaître que moyennant des investissements lourds. Pour éviter que ce scénario catastrophe ne se réalise, il est impératif d'offrir dès maintenant à cette filière des perspectives en termes de programmes.