

N° 5/2019

*recherches &
documents*

Avril 2019

Futur intercepteur endo-atmosphérique : quelles menaces et quelles technologies ?

STÉPHANE DELORY

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	5
1 – MUTATION DE LA MENACE : PORTEE, PRECISION ET MANŒVRABILITE	6
1.1 – L'évolution des systèmes balistiques	6
1.2 – L'apport de l'hypervélocité	9
1.3 – Les spécificités de la vitesse	11
1.4 – La menace résultant de la modernisation des défenses antiaériennes et antimissiles	12
2 – PROFILS DE MISSIONS ET CHOIX TECHNOLOGIQUES	14
2.1 – Vulnérabilités théoriques : têtes manœuvrantes et missiles hypersoniques stratégiques	14
2.2 – Vulnérabilité potentielle aux interceptions à très longue portée et à haute (20-30 km)/très haute altitude (30 km et plus)	16
2.3 – Vulnérabilité probable aux interceptions à haute altitude (20-30 km) sur des portées plus courtes.....	18
2.4 – Problématiques de guidage	21
2.5 – Intérêt de la solution pour une architecture de défense aérienne élargie	23
3 – PROBLEMATIQUES TECHNOLOGIQUES	24
3.1 – Extrapolation du modèle Meteor.....	24
3.2 – Recherches matériaux et capteurs pour missiles à très haute vitesse	26
3.3 – Algorithmie et intelligence artificielle.....	28
3.4 – Propulsions alternatives	28
4 – APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET CIVILES	30

Principaux points de l'étude

La menace représentée par les systèmes de frappe de longue et très longue portée, autrefois essentiellement incarnée par les missiles balistiques et les missiles antinavires hautement supersoniques, gagne en importance. Cette évolution est liée à la multiplication des systèmes d'armes dérivés de vecteurs balistiques – missiles à têtes manœuvrantes, missiles suivant des trajectoires quasi-balistiques –, à la modernisation des missiles hautement supersoniques et enfin à l'émergence des technologies hypersoniques.

Ces différentes catégories de missiles, conçues pour pénétrer les défenses antimissiles exo-atmosphériques traditionnelles et permettre des frappes de précision, opèrent une grande partie de leur trajectoire dans l'atmosphère. Toutefois, du fait de leur vitesse et de leur capacité de manœuvre, ils restent difficiles à intercepter, les intercepteurs endo-atmosphériques actuellement déployés ne disposant ni de la portée, ni de la vitesse nécessaire pour les engager avec succès.

Encore perçus comme une menace abstraite car réputés exclusifs aux grandes puissances militaires, ces systèmes de frappe se diffusent progressivement auprès de puissances régionales qui en perçoivent nettement l'intérêt opérationnel et le potentiel dissuasif.

La conception d'un intercepteur capable d'engager ces menaces et leurs évolutions futures peut être réalisée sur la base de technologies existantes. Un tel système d'arme serait cependant hautement spécialisé et inadapté à des architectures de défense qui assurent des missions de défense aérienne et de défense antimissile par le moyen d'engins polyvalents. Le besoin de polyvalence, crucial pour les forces européennes, impose d'adosser la conception d'un futur intercepteur à des technologies innovantes, ceci permettant de combiner les hautes vitesses et les longues portées autour d'un engin agile et compact.

Si les technologies hypersoniques ne pourront être utilisées avant de nombreuses années pour la conception d'un tel intercepteur, les technologies hautement supersoniques, exploitant les propulsions par statoréacteurs, laissent en revanche anticiper le développement d'un intercepteur volant aux frontières des vitesses hypersoniques (Mach 5) sur des portées longues, capable d'engager la majorité des menaces présentes et futures.

Un tel intercepteur ne peut cependant être conçu sans associer industries civiles et industries de défense, autant en termes de développement et d'intégration des technologies qu'en termes de valorisation ultérieure, tant au niveau civil que militaires. Très complexe dans son développement mais mieux maîtrisé que les systèmes de propulsion hypersoniques, le statoréacteur à haute performance ouvre la voie à une profonde évolution dans la conception des aéronefs du futur, autour d'engins très véloces mais économiques. Leur potentiel ne pourra toutefois être exploité que par une forte rationalisation des technologies nécessaires à leur mise en œuvre, à laquelle nombre d'industries de pointe devront être parties prenantes.

Futur intercepteur endo-atmosphérique :
quelles menaces et quelles technologies ?

Futur intercepteur endo-atmosphérique : quelles menaces et quelles technologies ?

INTRODUCTION

La défense antimissile connaît actuellement des évolutions fondamentales. Longtemps orientée vers l'interception de menaces en provenance des États proliférants, elle s'est avant tout focalisée sur le développement d'intercepteurs exo-atmosphériques devant permettre l'engagement de systèmes longue portée (MRBM, IRBM). Le choix d'une logique d'interception exo-atmosphérique visait également à limiter les conséquences de la destruction d'engins potentiellement associés à des armes de destruction massive, en traitant les cibles à des altitudes et à des portées élevées.

La complexité et le coût de développement des technologies d'interception exo-atmosphérique ont confiné leur développement aux États-Unis, les États européens préférant se concentrer sur le développement et l'acquisition de systèmes d'interception terminaux bas endo-atmosphériques de défense de point ou de zone. Bien qu'un savoir technique et industriel certain existe en Europe, et notamment en France ou en Allemagne, les pays européens tardent cependant à développer une capacité d'interception couvrant l'ensemble du spectre endo-atmosphérique et à capitaliser sur le savoir-faire existant.

Or, cet investissement est essentiel, aujourd'hui davantage qu'hier. En effet, depuis une vingtaine d'années, la maturation des technologies de guidage et de pilotage, l'évolution des technologies de propulsion et la transformation des architectures ISR¹ autour de plates-formes et de capteurs plus légers et performants ont conduit à une mutation de la menace, plus particulièrement sur les portées courtes et moyennes (300 à 2 500 km), qui deviennent progressivement les portées opératives de la plupart des théâtres d'opération. Sur ces distances, les systèmes balistiques de frappe dans la profondeur tendent désormais systématiquement à exploiter la manœuvrabilité, situant dorénavant la menace plus spécifiquement dans le champ endo-atmosphérique, mais dans une dimension différente de celle expérimentée jusqu'à nos jours. En effet, l'accroissement très notable

¹ Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, moyens destinés à l'identification et à l'engagement des cibles

de la vitesse et de la manœuvrabilité des systèmes actuellement en développement ne permet plus de traiter la menace par la seule modernisation des capteurs et des architectures ainsi que par la valorisation d'effecteurs existants, mais impose de concevoir de nouvelles familles d'effecteurs, exploitant des technologies innovantes, au niveau des propulsions mais aussi des capteurs terminaux, des matériaux, des algorithmes ou encore de l'intelligence artificielle.

I – Mutation de la menace : portée, précision et manœuvrabilité

I.1 – L'évolution des systèmes balistiques

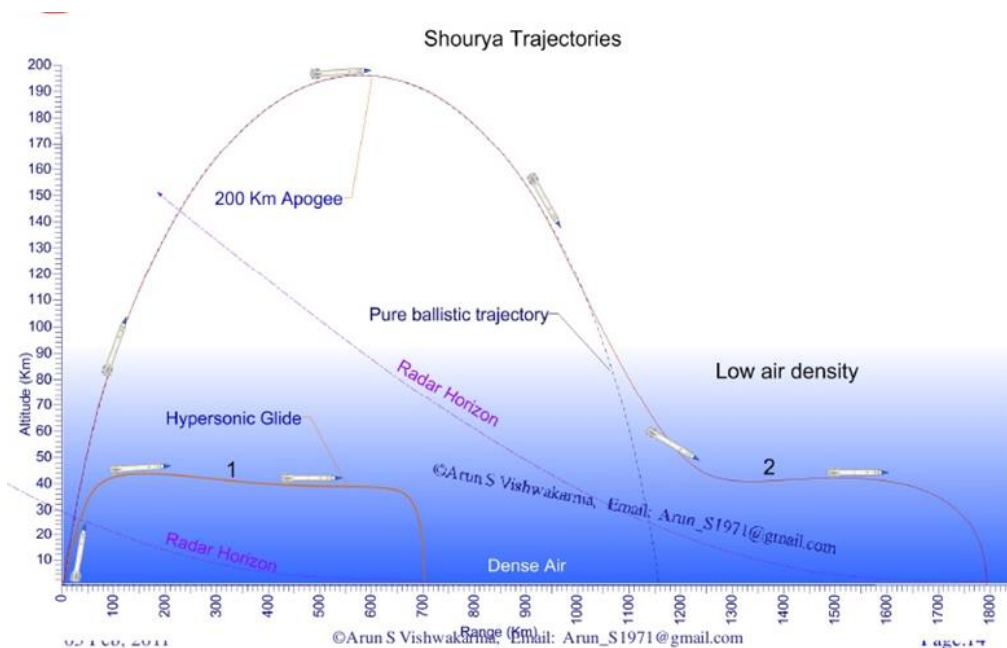
Alors que la frappe de précision a, jusqu'à la fin des années 1980, été assurée par l'aviation, le développement de systèmes de recalage externes (géo-positionnement par satellite), la modernisation constante des centrales inertielles et l'adjonction de systèmes de guidage terminaux fortement miniaturisés (capteurs optiques et radars, systèmes de corrélation d'image) ont permis d'accroître considérablement la précision des systèmes d'arme non pilotés. Cette précision théorique n'est cependant exploitable que si les engins peuvent manœuvrer. Longtemps réservée aux missiles aérobies, cette manœuvrabilité concerne désormais les vecteurs balistiques, plusieurs options étant offertes, par des manœuvres terminales opérées après la rentrée dans l'atmosphère pour les engins à une tête séparable, par le choix de trajectoires de vol quasi balistiques suivies de manœuvres terminales pour les missiles monocorps. Sur les portées courtes et moyennes, la manœuvrabilité permet d'augmenter la précision indépendamment de la portée, ramenant les erreurs circulaires probables de moins de 50 mètres pour les systèmes les plus rustiques à moins de 5 mètres pour les systèmes les plus modernes. Ces technologies se diffusent également pour les engins de portée intermédiaire (DF-26 chinois), leur donnant une capacité de frappe conventionnelle de précision. Ces systèmes restent cependant vulnérables aux interceptions exo-atmosphériques, l'engagement de la tête en deçà du point de rentrée permettant de l'éliminer avant qu'elle ne puisse manœuvrer. Par ailleurs, pour des missiles de moins de 1 500 km de portée, sur une trajectoire à énergie minimum, la discrimination des têtes est facilitée par la quasi-impossibilité de déployer des aides à la pénétration, facilitant l'interception.

Sur les portées courtes, les engins manœuvrants (missiles monocorps sur des portées inférieures à 800 km) sont exposés aux défenses endo-atmosphériques, lesquelles sont généralement mises en alerte lors de la phase balistique du trajet du missile. Dès lors, si les têtes manœuvrantes présentent des avantages réels, les États tendent systématiquement à les compléter par des missiles offrant des trajectoires différentes, généralement

quasi-balistiques sur les portées courtes, et désormais planantes sur les portées plus longues, afin de réduire le risque d'interception.

Sur les portées courtes et moyennes, la vulnérabilité croissante des engins purement balistiques face aux défenses est donc un facteur structurant dans le développement de vecteurs capables d'adopter des trajectoires totalement ou partiellement quasi-balistiques, qui certes réduisent les portées, mais permettent de neutraliser les défenses exo-atmosphériques et rendent les engagements endo-atmosphériques plus complexes, les engins pouvant avoir une trajectoire non linéaire². Très largement utilisée sur les systèmes courte portée (ATACMS américains, mais aussi possiblement C-401 chinois), l'application de phases de vol quasi-balistiques pour des engins de plus longue portée, de type SS-26 ou Fateh-313, est largement postulée mais encore mal documentée, ces types de missiles étant assez probablement utilisés selon une trajectoire balistique suivie d'une manœuvre terminale, du fait des fortes contraintes des trajectoires quasi-balistiques en termes de vitesse terminale et de portée.

Figure n° 1 : TYPE DE TRAJECTOIRES, ICI ASSOCIEES AUX LE DEVELOPPEMENT DU MISSILE INDIEN SHOURYA AU DEBUT DES ANNEES 2000³



De ce point de vue, l'introduction en service opérationnel du Kh-47M2 Kinjal russe, missile de type SS-26 aérolargué (ALBM), pourrait renforcer l'intérêt des trajectoires purement

² Décélération et changement d'altitude, inhérents aux vols en atmosphère rendent plus incertaine l'anticipation de la trajectoire.

³ Arun S. Vishwakarma, *Ballistic Glide Re-entry Vehicle (BGRV) and Indian Missile Program*, Bharat Pratham and India Research Foundation, 2011.

quasi-balistiques (augmentation des portées mais aussi des vitesses terminales) sans bien sûr prévenir l'adoption de trajectoires balistiques associées ou non à des manœuvres terminales. Du fait de ses avantages évidents, la première génération d'ALBM en cours de déploiement est amenée à être déclinée autour de vecteurs de diamètre inférieur (300 à 400 mm), élargissant la typologie des menaces air-sol sur les portées plus courtes.

Parallèlement, les systèmes haut-supersoniques plus classiques, développés et exportés par les Russes sur le segment des missiles antinavires (AS-4/Kh22, SS-N-22), connaissent des évolutions importantes. Actuellement, un missile AS-4/Kh-22, qui atteint des vitesses terminales de l'ordre de 1,2 km/s (Mach 4)⁴, réalise son vol de croisière à des altitudes très élevées (40 km) et dispose d'une forte capacité de manœuvre, représente déjà un type de menace difficile à intercepter. Le Kh-32, modernisation de l'AS-4/Kh-22, présenterait des performances très supérieures, qui pourraient approcher celles d'un Kinjal, mais probablement sur des domaines de vol différents, permettant au planificateur de combiner avantageusement les différents systèmes. Les missiles air-mer ou air-sol hautement supersoniques, souvent négligés dans les évaluations de menaces, représentent en fait une catégorie de menace immédiate, contre laquelle les défenses sont très mal adaptées, sauf à s'appuyer sur des architectures très complexes (NIFC-CA américaine par exemple⁵).

Contrairement à l'idée reçue, ces différentes catégories de systèmes ne sont pas spécifiquement innovantes et ne représentent que l'aboutissement de développements initiés dès les années 1970 autour des systèmes Pluton, SS-21, SS-23, MGM-140 (ATACMS), AS-4 ou même Skybolt (ALBM). Le SS-26 ou le Kh-47 russes, qui apparaissent comme des vecteurs de « rupture », sont en fait très représentatifs de cette fin de cycle, que les technologies hypersoniques viennent relayer. Leur déploiement est donc amené à devenir plus systématique alors que les probabilités d'exportation, longtemps réduites à quelques grands alliés, augmentent tendanciellement. Enfin, bien que le MTCR joue encore son rôle en limitant certains transferts, les technologies sont maîtrisées par un nombre croissant d'acteurs au sein du régime comme en dehors, autant au niveau des propulsions qu'au niveau des corps de rentrée manœuvrants. La présence de systèmes balistiques évolués et d'engins hautement supersoniques tend donc progressivement à devenir une normalité dans les arsenaux des puissances militaires, y compris au niveau régional.

⁴ L'équivalent entre le nombre de Mach et les kilomètres secondes est ici donné pour une altitude de 30 km, soit approximativement 0,3 km/s pour 1 Mach.

⁵ C'est à dire sur des architectures distribuées, combinant des capteurs aéroportés et des capteurs terrestres et susceptibles de bénéficier d'informations des architectures stratégiques. La NIFC-CA américaine permet également aux intercepteurs de bénéficier des données de capteurs distribuées, élargissant la zone de couverture.

1.2 – L'apport de l'hypervélocité

Bien que les systèmes balistiques manœuvrants soient à strictement parler des engins hypersoniques, les technologies hypersoniques en développement génèrent de nouvelles contraintes sur les défenses, qui varient en fonction des options technologiques retenues.

Les corps planants hypersoniques non propulsés, mis à poste par un booster lourd ou un petit lanceur à partir de plates-formes terrestres, navales ou aériennes représentent une catégorie de systèmes arrivant progressivement à maturité sur les portées moyennes et intermédiaires (2 000 à 3 000 km). De façon très générique, les paramètres d'altitude et de vitesse du corps planant dépendent de la puissance du lanceur et de la vitesse à la mise à poste puis à l'équilibre⁶, de sa trajectoire de rentrée ou encore de sa finesse⁷. Les développements actuels montrent un intérêt fort pour les planeurs « courte » portée (1 000 à 2 000 km), qui, en termes technologiques, sont désormais accessibles pour les États-Unis, la Russie et la Chine, et qui, à moyen terme, pourraient être développés par les États qui disposent d'une capacité de conception des têtes manœuvrantes, notamment par l'Iran. Pour ce type d'engin, une évaluation théorique de vitesses moyennes pourrait se situer autour de 2,1 à 2,4 km/s, pour des vitesses terminales pouvant se situer autour de 1,5 km/s. L'altitude de plané pourrait se situer entre 40 et 20 km.

Ces vitesses laissent une certaine capacité de manœuvre durant le trajet comme en phase terminale, très supérieure en tout état de cause à celle des missiles quasi-balistiques monocorps, y compris aérolargués, pour des engins qui disposeraient d'une allonge comparable à un vecteur balistique classique. Par comparaison, le SS-26M, seul missile balistique opérationnel réputé capable d'opérer un trajet totalement quasi-balistique sur des portées supérieures à 300 km, n'a qu'une vitesse estimée de 2,1 km/s à la fin des 25 secondes de sa phase propulsée, à une quinzaine de kilomètres d'altitude. La poursuite du vol quasi-balistique, qui serait réalisé à une quarantaine de kilomètres d'altitude, implique une décélération importante, qui impacte la portée mais qui expose également le missile aux défenses terminales, en dépit de sa capacité de manœuvre.

Les engins aérobies propulsés par un super-statoréacteur représentent une alternative aux corps planants, offrant d'autres perspectives opérationnelles. Lancés à une vingtaine de kilomètres d'altitude par booster, la première génération de ces engins devrait opérer sur des portées courtes à moyennes (800 à 1 500 km) mais pourrait soutenir des vitesses de 1,5 à 1,8 km/s sur des phases de vol longues (quatre minutes actuellement sur le prototype américain X-51, à 1,5 km/s). Les essais américains (X-51) montrent la possibilité d'utiliser les super-statoréacteurs avec des carburants traditionnels (kérosène

⁶ C'est-à-dire au moment où l'engin entame son plané dans l'atmosphère.

⁷ C'est-à-dire le rapport entre la portance et la traînée.

type JP-7), la Russie semblant avoir opté pour des carburants à base d'hydrogène offrant un meilleur rendement et une vitesse de pointe supérieure (1,8 km/s estimé sur le Zirkon contre 1,5 km/s pour le démonstrateur X-51), mais nettement plus complexes à mettre en œuvre et ne permettant qu'un gain de portée plus faible. Les vitesses atteintes permettent à une tête séparable non propulsée de disposer de suffisamment d'énergie pour réaliser un plané relativement long (5 minutes sur les essais du X-51) et/ou un ensemble de manœuvres complexes.

Bien que la gestion d'un super-statoréacteur reste encore très difficile (échauffement des matériaux, gestion des flux d'air et des ondes de choc dans les arrivées d'air et la chambre de combustion), l'utilisation de ce type d'engins présente un triple avantage prospectif :

- ➔ la propulsion longue permet au missile de manœuvrer sans perte nette d'énergie, laissant envisager une grande flexibilité dans l'élaboration des trajectoires et donc des missions ;
- ➔ l'oxygène servant de comburant durant la phase hypersonique, l'allongement de portée ne conduit pas à une augmentation excessive de la masse propulsive, ce qui réduit considérablement la masse et les dimensions du missile, y compris sur les portées longues ;
- ➔ enfin, conséquence directe de l'allègement de l'ensemble propulsif, celui-ci peut être décliné sur différentes familles de missiles et être adapté non seulement aux plates-formes terrestres et navales, mais aussi aux plates-formes aériennes légères de type chasseur bombardier.

Il faut également tenir compte du fait que la propulsion par stato et super-statoréacteur se fait autour de moteurs de conception complexe mais mécaniquement simples. Une fois les technologies industrielles maîtrisées, le coût unitaire d'un missile aérobie hypersonique devrait progressivement diminuer et pourrait s'approcher de celui d'un engin classique, pour des portées et des vitesses très supérieures. Il s'agit donc de munitions pouvant être systématiquement déclinées pour des usages tactiques, antinavires dans un premier temps (choix opéré par la Russie sur le 3M24 Zirkon), mais aussi air-sol, sol-air ou air-air.

La comparaison avec des missiles tactiques de haute performance actuels, tels que les Kh-22 et 32, est de ce point de vue illustrative, ce qui démontre la flexibilité potentielle de ces propulsions. Un démonstrateur X-51 pèse moins de deux tonnes (sans charge militaire), pour une vitesse de moyenne de 1,5 km/s et une portée maximale de 630 km. Un Kh-32 (évolution du Kh-22) aurait une portée de 800 à 1 000 km et une vitesse comprise entre 1,1 et 1,5 km/s (en phase terminale de vol), pour une masse de 6 tonnes, imposant l'emploi d'un bombardier tactique lourd (Tu-22M3M). L'exploitation tactique

de la vitesse passe donc par une transition vers les technologies hypersoniques, par utilisation de statoréacteurs à hautes performances (limite haut-supersonique-hypersonique) ou de super-statoréacteurs.

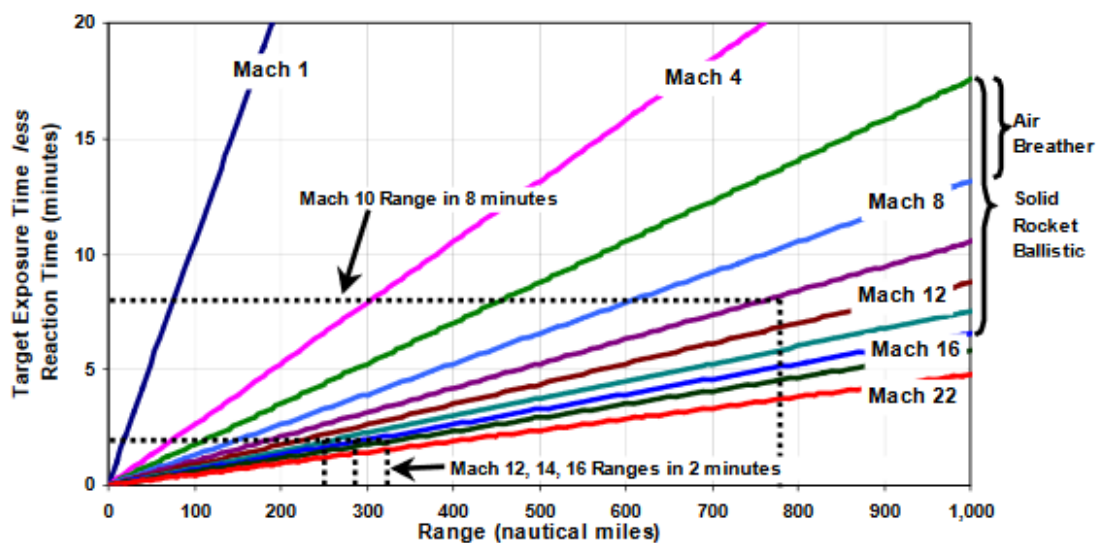
1.3 – Les spécificités de la vitesse

Les engins hypersoniques ne sont pas des substituts aux vecteurs balistiques manœuvrants, aux engins quasi-balistiques et aux missiles hautement supersoniques, mais constituent avant tout des compléments, qui permettent de combiner les avantages particuliers de chacun. Les missiles balistiques actuels et leurs dérivés offrent une capacité de frappe de décapitation et désormais un haut niveau de précision, et gardent toute leur pertinence si les défenses endo et exo-atmosphériques ne sont pas adaptées pour les engager. De leur côté, les systèmes hypersoniques permettent, sur la grande profondeur (2 000 à 3 000 km, sur des systèmes de type planeur), d'exploiter les mêmes logiques de promptitude et de fulgurance offertes par les systèmes balistiques mais aussi de limiter l'exposition aux défenses par la manœuvre et par la contraction du cycle d'engagement (détection, calcul de trajectographie et engagement).

Face à la combinaison de la portée des missiles, de leur vitesse élevée et de l'imprévisibilité des trajectoires, les architectures de détection et de trajectographie tendent à devenir inopérantes à partir du seul segment sol. Au niveau tactique, un missile supersonique volant à 0,7 km/s (Mach 2+) sur 600 km – performance que seul un Kh-22 peut actuellement accomplir – laisse un temps de réaction de 10 minutes à une défense l'identifiant à 400 km, contre moins de 4 minutes pour un système volant à 1,8 km/s (Mach 6), sachant que l'intercepteur doit pouvoir engager la cible avant qu'elle n'engage les manœuvres évasives terminales. Dans ce sens, le travail sur les systèmes hypersoniques se justifie d'abord pour les munitions tactiques, puisque c'est dans ce domaine particulier que l'effet de rupture technologique avec les systèmes existants est le plus significatif, permettant de restaurer un avantage décisif pour les systèmes offensifs. Le graphique suivant⁸ permet de mieux comprendre l'avantage présenté par la vitesse dans la compression du cycle d'engagement.

⁸ [Why and Whither Hypersonics Research in the US Air Force](#), SAB-TR-00-03, United States Air Force Scientific Advisory Board, décembre 2000.

Figure n° 2 : DUREE D'EXPOSITION DE LA CIBLE RAPPORTEE A LA VITESSE ET A LA PORTEE DU VECTEUR HYPERSONIQUE (PORTEE EN MILLES NAUTIQUES)



Développer un système de frappe tactique disposant d'une vitesse élevée permet de faire porter l'essentiel de l'effort de modernisation sur le ciblage et le guidage, un système capable d'atteindre 1,8 km/s pouvant engager sa cible en moins de 7 minutes sur environ 1 000 km. La vitesse permet donc non seulement de mettre en place des stratégies de décapitation simultanée contre des objectifs fixes, mais également de développer des logiques de frappe d'opportunité contre toutes sortes d'objectifs mobiles, y compris stratégiques. L'État qui peut s'appuyer sur une capacité C4ISR robuste est alors en mesure d'engager systématiquement tout type de cible dans la profondeur du théâtre. Sauf à éliminer le C4ISR, l'interception des vecteurs devient donc un enjeu essentiel.

1.4 – La menace résultant de la modernisation des défenses antiaériennes et antimissiles

La confrontation entre les systèmes de défense antiaériens soviétiques puis russes et les forces aériennes occidentales, expérimentée de manière récurrente depuis les années 1970 au Moyen-Orient, montre l'impact dissuasif élevé généré par le déploiement d'intercepteurs longue portée de haute performance. Les exemples documentés sont connus et portent aussi bien sur le déploiement de SA-4 en Syrie durant les années 1970 que sur les menaces d'acquisition de S-300 PMU-I par l'Iran dans les années 2000 ou sur l'utilisation « diplomatique » des S-400 par les Russes en Syrie depuis 2015. Certes, l'efficacité des effecteurs est très dépendante de la complémentarité avec les systèmes de plus courte portée, de la qualité des capteurs du segment terrestre, des architectures et de l'organisation des défenses. Il n'en demeure pas moins que le déploiement d'intercepteurs de longue portée modernes permet, en temps de paix comme dans un contexte

de conflit de basse intensité, d'entraver l'activité des forces aériennes adverses, tant au niveau des activités ISR que des opérations de supériorité aérienne ou de frappe.

Parallèlement, la doctrine d'emploi de systèmes longue portée de type PAC-2 ou PAC-3 ou le déploiement opérationnel des S-400 russes en Syrie mettent en évidence le rôle que peuvent jouer ces systèmes dans les opérations aériennes offensives, ces systèmes étant progressivement définis pour pouvoir œuvrer en complémentarité, voire en substitution, des forces aériennes dans la défense du champ de bataille mais aussi dans sa profondeur opérative. Du fait de la très grande portée de leurs effecteurs, des systèmes comme les S-400 et les S-300V jouent un rôle crucial contre les plates-formes ISR aéroportées lourdes de type AWACS, RC-135 ou JSTARS, contribuant à entraver les capacités de ciblage et d'engagement des forces adverses, aux niveaux terrestre comme aérien. L'un des principaux enjeux de la modernisation des systèmes actuels est de garantir, sur ces distances, une capacité d'engagement contre des cibles plus agiles et rapides (chasseurs bombardiers et chasseurs de supériorité aérienne). Cette augmentation de performance est d'autant plus cruciale que les moyens ISR des chasseurs de dernière génération leur permettent de réaliser une partie des missions jadis dévolues aux AWACS (voire aux JSTARS) et que l'allongement de portée de leurs munitions permet un engagement à des distances de sécurité élevées. Dans ce sens, cette catégorie de missiles pourra permettre de créer des zones d'exclusion très au-delà du champ de bataille, dans la profondeur du théâtre, contribuant à façonner la supériorité aérienne et à faciliter l'élimination des défenses.

Cet élargissement progressif du rôle de la défense aérienne se construit essentiellement sur la valorisation des technologies existantes et plus particulièrement sur l'allègement des structures et de la charge utile, élargissant la polyvalence des systèmes longue portée et leur permettant d'opérer sur un spectre de portées et d'altitudes plus large. Les performances théoriques des intercepteurs longue portée en cours de déploiement se situent autour de 300 à 400 km pour une altitude d'interception allant de quelques kilomètres à plus de trente kilomètres (S-400 et S-300V4). L'utilisation quasi exclusive des propulsions solides limite toutefois leur capacité d'engagement contre des cibles très véloces sur des portées longues, mais aussi contre des cibles plus lentes mais très agiles. Si l'accroissement possible du nombre de missiles balistiques de portée intermédiaire à têtes manœuvrantes impose de consolider le segment exo-atmosphérique des défenses antimissiles, la transformation de la nature des menaces endo-atmosphériques de plus courte portée et la continuité des missions de défense antiaérienne classiques impliquent également de repenser la modernisation des effecteurs plus traditionnels, autour de systèmes flexibles et polyvalents capables de traiter les nouvelles menaces endo-atmosphériques.

2 – Profils de missions et choix technologiques

Définir les technologies pouvant être exploitées pour répondre à ces menaces dépend évidemment des profils de missions retenus. En matière de défense aérienne et antimissile (DAE), en fonction des ressources budgétaires mais aussi des cultures militaires, certains États tendent à spécialiser leurs défenses, déclinant les systèmes d'armes en fonction des catégories de menaces (approche russe), alors que d'autres adoptent une approche plus globale, organisée autour de systèmes plus polyvalents qui, combinés à des architectures de détection et d'engagement plus évoluées, sont aptes à traiter un spectre de menaces plus large (approche américaine). Les États européens se situent cependant dans une perspective autre, la rareté de la ressource budgétaire prévenant l'acquisition de systèmes trop spécialisés alors que le déficit d'architectures ne permet pas de s'appuyer sur celles-ci pour valoriser des solutions techniques existantes. La recherche de polyvalence doit donc s'organiser autour d'un système d'arme suffisamment novateur pour couvrir un maximum de menaces prévisibles sans requérir de transformations massives des architectures existantes. Dès lors, la définition des missions possibles du futur intercepteur est essentielle, puisqu'elle doit permettre de dimensionner finement ses caractéristiques en fonction des vulnérabilités des menaces à traiter et des zones et domaines d'engagement probables.

2.1 – ***Vulnérabilités théoriques : têtes manœuvrantes et missiles hypersoniques stratégiques***

En admettant une capacité de détection optimale sur l'ensemble de la trajectoire du missile balistique, quasi-balistique et hypersonique, les différents points de vulnérabilité sont multiples. Si l'on exclut du raisonnement la phase de trajectoire balistique où l'interception exo-atmosphérique pourra être privilégiée, les zones de vulnérabilité peuvent être situées dans la phase de transit des systèmes quasi-balistiques et hypersoniques et dans la phase initiale de réentrée des engins manœuvrants. Dans ces cas de figure en effet, la manœuvrabilité des engins est moindre, la plupart d'entre eux opérant en haute altitude.

Dans le cas des têtes manœuvrantes, il pourrait être jugé souhaitable d'engager le missile immédiatement avant la phase de réentrée, à un moment où sa trajectoire est encore balistique ou durant les premières secondes de la réentrée. Dans l'ensemble cependant, l'interception d'une tête manœuvrante mise à poste par un missile de type MRBM, IRBM ou ICBM durant sa phase de manœuvre, peu avant la phase de réentrée (si la tête bénéficie d'une propulsion), voire immédiatement après, reste techniquement très difficile à réaliser, du fait de la distance entre l'engagement de la manœuvre et la cible, qui peut excéder 200 km, mais aussi de la vitesse et de l'altitude de la tête dans les premières

phases de manœuvre. D'autre part, une variation de la trajectoire balistique peut entraîner des modifications majeures des paramètres d'engagement. Ce type de cible sera donc plus probablement engagé par un intercepteur exo-atmosphérique opérant avant l'initiation de toute manœuvre. Les tableaux suivant donnent une idée des distances et altitudes à envisager, à partir d'une tête disposant d'une propulsion additionnelle pour entamer la manœuvre peu avant la réentrée⁹.

Figure n° 3 : PROFIL DE RENTREE D'UNE TETE MANŒVRANTE DE DF-21, TIRÉE SUR UN OBJECTIF DISTANT DE 2 000 KM EN TRAJECTOIRE PLATE AVEC UNE CORRECTION DE TRAJECTOIRE DE 20 KM PAR RAPPORT A LA TRAJECTOIRE PUREMENT BALISTIQUE

Manœuvre après le lancement/temps de vol total (s)	Altitude de manœuvre (km)	Distance par rapport à la cible (km)	Durée de vol restante, de la manœuvre à l'impact (s)	Vélocité au point de manœuvre (km/s)
483/637	200	649	154	3,86
535/637	150	445	102	3,98
575/637	100	285	62	4,10
592/637	75	213	45	4,16

Figure n° 4 : PROFIL DE RENTREE D'UNE TETE MANŒVRANTE DE DF-21, TIRÉE SUR UN OBJECTIF DISTANT DE 2 000 KM EN TRAJECTOIRE PLONGEANTE AVEC UNE CORRECTION DE TRAJECTOIRE DE 20 KM PAR RAPPORT A LA TRAJECTOIRE PUREMENT BALISTIQUE

Manœuvre après le lancement/temps de vol total (s)	Altitude de manœuvre (km)	Distance par rapport à la cible (km)	Durée de vol restante, de la manœuvre à l'impact (s)	Vélocité au point de manœuvre (km/s)
909/974	200	284	65	3,72
928/974	150	212	46	3,85
944/974	100	148	30	3,97
953/974	75	116	21	4,03

En matière de missiles dotés de têtes manœuvrantes, il est assez probable que les menaces dont l'engagement peut être envisagé par un intercepteur polyvalent se restreignent à des engins de type SRBM, entamant la manœuvre à des distances relativement courtes et à des vitesses relativement faibles. On peut postuler que pour des missiles dépassant les 1 000 km de portée qui, sur des trajectoires à énergie minimale, opèreront la réentrée à plus de 2,7 km/s, l'interception des têtes manœuvrantes nécessiterait un

⁹ Srinivasan Chandrashekar (et al.), *China's Anti-Ship Ballistic Missile Game Changer in the Pacific Ocean*, National Institute of Advanced Studies, Bangalore (Inde), 2011.

intercepteur dédié, exo-atmosphérique ou, possiblement, approchant un engin de type THAAD amélioré.

La question de l'interception des planeurs stratégiques est également à exclure de la réflexion. L'interception de tels vecteurs (type HTV-2, AHW ou éventuellement Yu-71)¹⁰ est actuellement difficile à concevoir, l'association de l'altitude – le plané serait initié autour de 60 km d'altitude et associé à plusieurs rebonds dans l'atmosphère –, de la vitesse – largement supérieure à 3 à 4 km/s sur une longue partie de la trajectoire – et de la manœuvre – c'est-à-dire *a minima* la combinaison de la décélération et de la variation d'altitude, sans même parler de variation d'azimut – générant de telles incertitudes que seul un effecteur et une architecture ultraspécialisés peuvent être considérés.

Les programmes américains et chinois semblent toutefois annoncer le développement de planeurs tactiques, de portée plus courte, qui pourrait se situer autour de 1 000 à 3 000 km. Certains de ces engins pourraient donc être traités par un intercepteur endo-atmosphérique. Ce dernier est également bien adapté à l'engagement contre les missiles bas hypersoniques, propulsés par super-statoréacteurs, et contre les missiles hautement supersoniques. Missiles quasi-balistiques et ALBM de première génération peuvent également être anticipés comme des cibles potentielles.

2.2 – Vulnérabilité potentielle aux interceptions à très longue portée et à haute (20-30 km)/très haute altitude (30 km et plus)

La catégorie de cible envisagée peut conduire à imaginer leur interception très en amont de la phase de vol terminale. Ce scénario présente l'intérêt d'engager le missile adverse durant une phase de vol pendant laquelle la manœuvre résulte avant tout des effets du profil de vol choisi (décélération, changement d'altitude) et éventuellement des changements de direction, mais non de manœuvres destinées spécifiquement à leurrer un intercepteur. Compte tenu de l'absence de systèmes de détection embarqués, il est très probable que d'éventuelles manœuvres défensives seront préprogrammées et limiteront la capacité du missile ciblé à éviter l'interception en tout point de sa trajectoire. Dès lors, bien que l'interception doive s'appuyer sur des données de trajectographie externes transmises en temps réel, du tir de l'intercepteur jusqu'à l'engagement des capteurs embarqués, elle serait réalisée face à un objet dont la trajectoire pourrait potentiellement être anticipée.

Ce modèle serait applicable à la plus grande partie de la trajectoire d'un missile quasi-balistique, relativement lent et qui ne peut que manœuvrer marginalement durant le

¹⁰ Les programmes HTV-2 et AHW portent sur la validation de concept de planeurs de plus de 10 000 km de portée (HTV-2) et de 6 000 à 8 000 km de portée (AHW). Le Yu-71 serait un planeur associé à un lanceur lourd (SS-19), mais les caractéristiques de la trajectoire envisagée sont inconnues.

transit, sous peine de perdre l'énergie nécessaire à la manœuvre terminale. Il le serait aussi pour un missile hypersonique propulsé par super-statoréacteur, dont la vitesse est relativement stable et dont la capacité de manœuvre violente est restreinte par son mode de propulsion. Toutefois, il peut être souhaitable d'engager ces deux types de cibles plus tard, le missile quasi-balistique ayant perdu beaucoup de sa vitesse en fin de trajectoire, alors que le missile propulsé par super-statoréacteur opérera à vitesse constante. L'interception peut donc être réalisée juste avant la phase terminale de leur vol, c'est-à-dire avant que la tête engage des manœuvres évasives.

L'interception à très longue portée pourrait être également envisagée pour un planeur non stratégique, avec des contraintes très fortes cependant, du fait des altitudes et des vitesses en début de trajectoire planée. Elle pourrait éventuellement être envisagée face à des planeurs tactiques courte portée plus lents.

Le scénario d'interception à très longue portée pose malheureusement une triple contrainte. Il n'est réalisable qu'associé à une architecture évoluée, repérant le missile cible et définissant des éléments de trajectographie très en amont. D'autre part, un planeur hypersonique ou un missile propulsé par super-statoréacteur ayant une capacité de déport non négligeable, il existe une incertitude dans la définition anticipée de l'objectif final. Cette incertitude s'accroît si le tir de l'intercepteur est réalisé très tôt et rend plus difficile la définition d'une zone assurée d'engagement, où, quelle que soit la direction prise par la cible, l'intercepteur sera systématiquement en mesure de l'engager. L'interception à très longue portée se heurte ici à un problème difficile à résoudre, la capacité de déport associée à la vitesse de la cible permettant facilement de la mettre en échec.

Un intercepteur propulsé par un super-statoréacteur pourrait apparaître comme une option possible, du fait de sa vitesse, de sa portée potentielle et de sa capacité à demeurer propulsé sur de longues distances. Toutefois, il ne pourrait opérer contre des planeurs opérant en atmosphère très raréfiée (au-delà de 35 km d'altitude), sauf si un véhicule intercepteur relativement lourd à propulsion solide ou liquide lui était ajouté, option qui dégraderait les performances générales du missile ou imposerait de développer un intercepteur lourd. De surcroît, un tel intercepteur n'offrirait pas d'avantages significatifs contre les missiles de croisière haut-supersoniques ou bas-hypersoniques, et serait probablement inadapté à l'interception des cibles aériennes agiles. D'un point de vue plus strictement technique, ce type de propulsion reste encore inadapté à la propulsion d'un missile sol-air, la gestion du domaine de vol du super-statoréacteur demeurant extraordinairement complexe et la maturité de la technologie ne permettant pas de développer une propulsion capable de soutenir un engin manœuvrant.

2.3 – **Vulnérabilité probable aux interceptions à haute altitude (20-30 km) sur des portées plus courtes**

Bien que l'engagement à très longue portée et à très haute altitude puisse représenter une solution de long terme, disposer d'un intercepteur opérant aux altitudes opérationnelles actuelles et capable d'engager des menaces futures sur des altitudes de 20 à 30 km demeure une nécessité. C'est en effet dans ces régions de l'atmosphère que les missiles disposent de la plus grande manœuvrabilité mais que la densité de l'air reste assez diffuse pour leur permettre de garder des vitesses élevées. Il s'agit donc typiquement d'un domaine où les futurs vecteurs à intercepter seront très susceptibles d'opérer dans la dernière phase de leur vol.

Bien que la manœuvrabilité soit une contrainte forte, il peut être anticipé que les vitesses à considérer facilitent l'interception. Ainsi la vitesse des engins propulsés pourrait se situer entre 1,2 km/s (engins hautement supersoniques de type Kh-32) et 1,8 km/s (vitesse maximale donnée pour le Zyrkon par les Russes). La vitesse d'un planeur hypersonique tactique est plus difficile à estimer, mais les quelques données relatives au TBG américain¹¹ peuvent laisser supposer une vitesse terminale de 1,5 km/s, la vitesse terminale d'un système quasi-balistique comme le SS-26 étant probablement inférieure. Un SS-26 (ou un équivalent) opérant par trajectoire balistique puis manœuvre terminale serait probablement engagé par des défenses terminales bas-endo-atmosphériques.

À ces vitesses, les cibles considérées doivent pouvoir être engagées à des distances longues, qui peuvent probablement se situer autour de la centaine de kilomètres, à un moment où la cible a perdu en vitesse, mais avant que les manœuvres terminales soient entamées. Cette distance d'engagement permet de surcroît de s'appuyer sur les architectures de détection au sol, nécessaires à la définition de la trajectoire de l'interception jusqu'à l'engagement de ses capteurs terminaux. Toutefois, du fait de la vitesse et de la capacité de manœuvre de la cible, l'intercepteur doit lui-même disposer d'une vitesse élevée et la maintenir sur l'essentiel de son trajet, afin de pouvoir manœuvrer sans perdre sa vitesse durant sa trajectoire comme lors de la phase terminale de l'interception.

Si le super-statoréacteur n'est pas encore une solution, le statoréacteur offre de ce point de vue des possibilités intéressantes, en termes de vitesse, de durée de propulsion et de portée. Les statoréacteurs ont déjà été utilisés pour la propulsion de missiles antiaériens, notamment par les Russes sur le SA-4 et les Américains sur le Talos (RIM-8), ou par les Britanniques sur le Bloodhound. Ils restent largement employés par les Russes pour les missiles mer-mer (SS-N-19, 22 et 26), air-mer (AS-17) et air-air (variantes de l'AA-12),

¹¹ Le TBG (*Tactical Boost Glide*) représente le seul programme de planeur tactique sur lequel quelques données de presse sont disponibles.

mais aussi par la France et les Européens pour des systèmes air-sol (ASMP-A) et air-air (Meteor). Bien que de très nombreux programmes de recherche aient été lancés dans les années 1990, l'utilisation du statoréacteur pour un intercepteur est devenue rare, le système le plus utilisé ayant été le SA-6 russe. Elle a depuis été largement abandonnée au profit des propulsions solides plus classiques, du fait de certaines limitations.

D'une part, la gestion des flux d'air, des entrées d'air jusqu'à la chambre de combustion, a longtemps représenté un défi complexe à résoudre, plus particulièrement lors de changements d'incidence brutaux, pouvant conduire à des chutes de performances ou à des limitations non négligeables du domaine de vol. D'autre part, du fait des contraintes de masse, le carburant des intercepteurs est un propergol solide, ce qui a longtemps empêché la gestion fine de l'alimentation de la chambre de combustion, limitant la possibilité d'adapter la trajectoire du missile en fonction du domaine de vol optimal. Sur un plan plus général, la résolution des multiples paramètres liés à la gestion des flux d'air, aux ondes de choc et à la combustion tend à devenir plus complexe au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse (instabilités thermoacoustiques et aérodynamiques). Dès lors, la conception d'un intercepteur sol-air très vélocé, pouvant opérer en haut du régime du statoréacteur (autour de 1,5 km/s, soit Mach 5), a longtemps été irréalisable, les systèmes étant généralement limités en vitesse (0,6 à 1 km/s soit Mach 2 à Mach 3) comme en manœuvrabilité.

Ces multiples obstacles contribuent à expliquer le choix des propulsions solides classiques dans la conception d'intercepteurs endo-atmosphériques, les vitesses en fin de propulsion pouvant atteindre 1,5 à 2 km/s sans contrainte particulière sur le domaine de vol. Toutefois, et même en tenant compte des progrès considérables réalisés dans les propulsions solides, développer un intercepteur pouvant maintenir une vitesse élevée sur une trajectoire longue est impossible sur un missile léger, adapté à l'interception antimissile comme à la DAE. Un intercepteur 48N6 (S-300 PM-1), qui représente un exemple typique de cette catégorie de systèmes, atteint 1,9 km/s en fin de propulsion, pour une portée de 150 km. Il n'est cependant propulsé que sur 12 secondes, réalisant les deux tiers de sa trajectoire en vol non propulsé. La vitesse moyenne d'un 40N6 (S-400) est donnée pour 1,2 km/s de moyenne, le missile ayant une portée déclarée de 380 km. Performants contre des cibles balistiques très véloces à des distances d'engagement courtes, ces deux missiles seraient inefficaces contre des cibles manœuvrantes engagées à portée longue, devant alors manœuvrer sans propulsion. Le THAAD ER semble actuellement être le seul système à propulsion solide en développement susceptible de couvrir ce type de menace. Initié en 2006, le programme rencontre toutefois des difficultés de développement.

La limite de la propulsion solide dans la conception d'un missile polyvalent devant être propulsé sur une phase longue s'explique par la nature même du propergol, qui combine oxydant et carburant. Le premier peut représenter jusqu'à 85 % de la masse totale du

propergol¹². L'oxydant d'un statoréacteur ou d'un super-statoréacteur étant l'air, c'est autant de masse qui n'est pas embarquée sur le missile, permettant un allègement considérable et une phase de propulsion nettement plus longue à masse équivalente de carburant embarqué. Cet allègement se traduit par un rendement très supérieur de la propulsion, puisque l'impulsion spécifique¹³ des propergols solides utilisés sur les missiles se situe généralement entre 200 et 300 secondes, mais peut s'échelonner entre 1 500 et 3 000 secondes pour un statoréacteur.

La capacité du statoréacteur à garder sa vitesse indépendamment des manœuvres qui lui sont imposées par la cible est un élément plus déterminant que la vitesse de pointe obtenue par une propulsion solide, plus particulièrement si l'intercepteur réalise l'ensemble de son vol en atmosphère dense. À masse égale de carburant embarqué, la vitesse moyenne assurée par un statoréacteur à hautes performances sera supérieure, comme sa vitesse terminale, au moment de l'engagement. Ce type de propulsion présente donc un avantage important face à des cibles très véloces et manœuvrantes, l'intercepteur devant ajuster sa trajectoire durant le vol et bénéficier d'une énergie maximale au moment d'engager les manœuvres terminales.

L'utilisation d'un statoréacteur opérant en haut de son régime, qui pourrait soutenir des vitesses de 1,5 km/s sur des phases de propulsion longue, représente donc une solution optimale face aux menaces considérées puisqu'à l'exception des têtes manœuvrantes et des planeurs qui seraient tirés par des lanceurs de type MRBM ou IRBM, sa vitesse approcherait, voire dépasserait, celle de la majorité des cibles considérées. Autre avantage, la portée effective du missile pourrait être plus facilement adaptée, la charge de carburant additionnelle nécessaire à l'augmentation de portée du missile étant très inférieure à la charge correspondante en propergol solide. Cette flexibilité permet d'envisager de développer des familles d'intercepteurs adaptées aux différents types de menaces, selon l'évolution de celles-ci. Dès lors, si les portées d'engagement envisagées sont actuellement de l'ordre de 100 km, elles pourraient être sensiblement allongées en cas de besoin.

Plus encore que la portée, l'intérêt fondamental de cette solution se situe dans la capacité de l'intercepteur à manœuvrer dans la durée face à une cible non prédictive qui opérera une part substantielle de son trajet terminal à des altitudes cohérentes avec la sienne. L'allongement de la portée d'engagement n'a pas d'intérêt s'il conduit à envisager l'interception à un moment où l'altitude de la cible et sa vitesse sont clairement en défaveur de l'intercepteur. La portée idéale sera donc définie en fonction de l'altitude et

¹² François Poulain, « Commande d'un véhicule hypersonique à propulsion aérobie : modélisation et synthèse », École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012.

¹³ Très schématiquement, l'impulsion spécifique d'une propulsion donnée, exprime la durée (généralement donnée en secondes) durant laquelle la combustion d'un kilogramme d'ergols ou de propergol produira une poussée d'un kilogramme.

de la distance à laquelle la cible est la plus vulnérable du fait de sa décélération mais aussi en fonction de l'altitude optimale de fonctionnement de l'intercepteur (20 à 30 km), en tenant compte des contraintes liées au calcul de trajectographie, de correction de cap et d'activation des capteurs terminaux. Cette approche, permet de concevoir un intercepteur léger, compact et polyvalent et donc exploitable pour des missions de défense antimissile mais aussi pour des missions de défense antiaérienne.

2.4 – **Problématiques de guidage**

La propulsion n'est cependant qu'une partie du problème. En effet, l'interception d'une cible très vélocité pose des contraintes de navigation et de guidage très particulières, les capteurs et les systèmes de navigation des intercepteurs endo-atmosphériques actuels étant pour la plus grande majorité d'entre eux adaptés à l'engagement de cibles purement balistiques, sur des trajectoires prédictives, et à celui de cibles plus manœuvrantes mais nettement plus lentes, pour les missions de DAE.

Face à un objet hyper-vélocité, le facteur temps devient un élément déterminant dans le paramétrage des fonctions de guidage et de navigation. En moyenne, en conditions de guidage théorique, le temps maximal nécessaire au capteur pour définir une solution de guidage permettant d'attendre la cible visée se situe entre deux et dix secondes. Plus la portée de détection est allongée, plus le capteur dispose de marge pour corriger sa trajectoire et adapter ses manœuvres à la cible avec une consommation minimale d'énergie. Plus la portée de détection est courte, plus l'intercepteur devra manœuvrer violemment ou est susceptible de ne plus être en mesure de corréliser son cap à celui de la cible. La nécessité d'augmenter la portée du capteur devient de plus en plus critique au fur et à mesure que la vitesse relative s'accroît, sachant que pour les types de cibles considérés, les vitesses relatives devraient dépasser 3 km/s. Si l'on admet cette vitesse pour l'exemple, la distance où le capteur pourrait opérer avec une marge de sécurité serait *a minima* de 30 km. Toutefois, il faut tenir compte, dans le calcul, des contraintes de temps additionnelles liées aux positions relatives de l'intercepteur et de sa cible, qui impliquent un ajustement permanent, mais aussi les contraintes physiques liées à la détection de la cible et au pilotage du missile. Ainsi, non seulement la correction de trajectoire ne donne pas forcément le cap idéal (la solution de guidage proportionnel pouvant être imparfaite), mais la réception du signal par le capteur est soumise à des distorsions, du fait de la nature de la cible et de son positionnement par rapport aux capteurs, des effets sur le radome et de la latence entre la définition de la solution de correction de cap et la transmission physique des données aux actionneurs. Cette somme d'imperfections allonge le temps de réaction de l'interception et induit des corrections d'attitude supplémentaires que seul l'allongement de portée de détection permet d'optimiser. Les deux exemples ci-dessous en donnent une bonne illustration.

Figure n° 5 : TEMPS NECESSAIRE A LA CORRECTION D'UNE DIFFERENCE DE CAP DE 10° ET DISTANCE D'ERREUR ASSOCIEE (EN PIEDS) EN FONCTION DU TEMPS DE REACTION (EN S.) CAPTEUR-ACTIONNEURS DE 0,5 S ET 0,1 S¹⁴

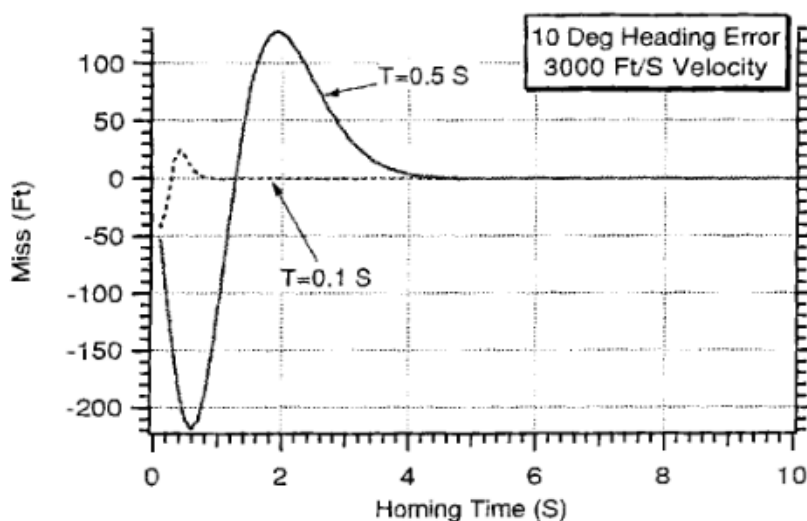
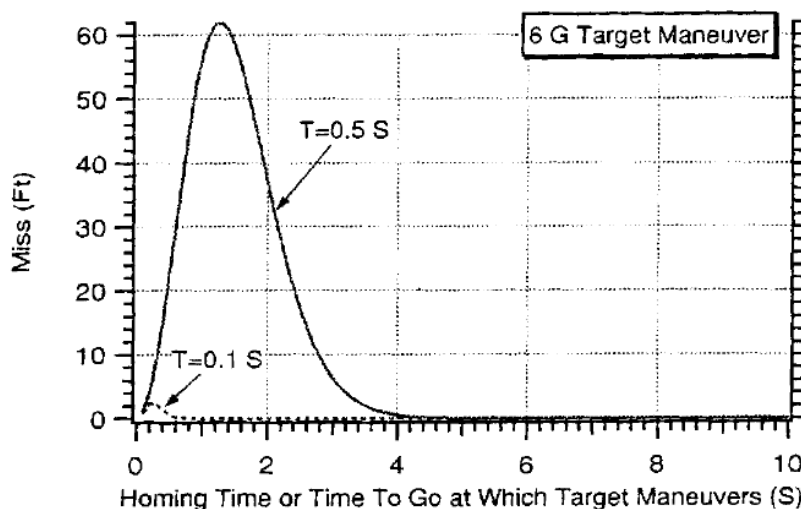


Figure n° 6 : ERREUR (EN PIEDS) GENERE E PAR UN TEMPS DE REACTION (EN S.) CAPTEUR-ACTIONNEURS DE 0,5 S ET 0,1 S FACE A UNE CIBLE VOLANT A 1 KM/S ET AYANT EFFECTUE UNE MANŒUVRE DE 6G¹⁵



À l'allongement de portée s'ajoute le problème de la fiabilité de la piste définie par le capteur terminal, opérant aux limites physiques auxquelles ces systèmes sont traditionnellement confrontés. Pour opérer sur des distances longues, un capteur électromagné-

¹⁴ Paul Zarchan, « Ballistic Missile Defense Guidance and Control Issues », *Science & Global Security*, 1998, Volume 8, pp. 99-124.

¹⁵ Ibid.

tique pourrait demander une quantité d'énergie excédant la résistance de ses composants. Il peut ainsi être souhaitable d'opter pour un capteur pouvant opérer simultanément dans le spectre infrarouge et électromagnétique. Un tel choix présente l'avantage d'accroître la qualité de la piste, de limiter les risques de brouillage mais aussi d'utiliser le système de détection le plus adapté ou, alternativement, d'utiliser les ressources du capteur passif pour limiter la demande sur le capteur actif.

D'autre part, il faut considérer que dans nombre de cas, du fait de la manœuvre de la cible, l'intercepteur obtiendra une solution de guidage valable relativement tardivement. Plus le temps de réaction disponible sera court, plus la manœuvre corrective devra être forte. Dans ces cas de figure, l'avantage présenté par un intercepteur propulsé sur la plus grande partie de son trajet (voire sur sa totalité), mais aussi capable de moduler sa vitesse pour optimiser son placement par rapport à la cible ou pour limiter les contraintes affectant le capteur terminal, est évident, l'engin disposant de l'énergie maximale pour effectuer une manœuvre sous fort facteur de charge mais pouvant également adapter sa trajectoire pour combiner une plus grande probabilité de détection et une manœuvre violente. Cette flexibilité permet de surcroît de combiner des modes de pilotage, associant le pilotage par les appuis aérodynamiques au pilotage en force, selon le principe déjà développé sur l'Aster. Le pilotage en force, opéré par procédé pyrotechnique, permet de limiter le temps de latence des actionneurs aérodynamiques qui, de quelques dixièmes de seconde pour ces derniers, peut se ramener à quelques centièmes de seconde pour le premier. Ce gain de manœuvrabilité est donc un avantage majeur, qui contribue à améliorer la réactivité de l'ensemble du système d'arme, dans ses fonctions dynamiques comme dans ses fonctions strictement relatives au capteur terminal.

2.5 – Intérêt de la solution pour une architecture de défense aérienne élargie

Si les avantages d'un intercepteur propulsé par statoréacteur apparaissent clairement pour l'interception d'une cible très vélocité, ils sont tout aussi évidents si l'on considère la mission du missile dans sa dimension antiaérienne. La longue phase de propulsion permet en effet d'envisager l'interception des aéronefs dans deux configurations majeures : la destruction des plates-formes ISR aéroportées lourdes (type AWACS ou JSTARS) sur de très grandes distances, dans la logique actuelle des missiles de type 48N6 ou 40N6 (systèmes S-300 et S-400), et l'engagement, sur des distances plus courtes mais néanmoins sensiblement plus longues que celles permises par l'ensemble des intercepteurs de DAE actuellement déployés, de cibles agiles, de type chasseurs et chasseurs bombardiers.

La première mission, que la plupart des systèmes d'interception actuellement développés aux États-Unis et en Europe ne permettent qu'imparfaitement de remplir, n'est pas forcément la plus simple. En effet, le format des futures plates-formes ISR aéroportées

évolue progressivement, d'appareils relativement lourds, peu agiles et mal protégés vers des appareils plus légers mais aussi mieux protégés par des défenses passives (brouillage, leurres) et actives (lasers d'autodéfense, voire systèmes électromagnétiques). Il est donc à anticiper qu'à courte échéance, l'engagement de ce type de plates-formes soit plus complexe, le système de guidage du missile devant surmonter les contre-mesures mais aussi exploiter la vitesse et la manœuvre pour limiter les effets des défenses actives.

La mission d'interception d'appareils agiles sur les portées longues représente également un enjeu de taille, la majorité des intercepteurs ne pouvant engager une cible aérienne agile à très longue portée si celle-ci est alertée suffisamment en avance du tir du missile intercepteur. En effet, sur des distances longues, un appareil agile dispose d'une large gamme de manœuvres, complémentaires à l'activation des contre-mesures et des leurres, pour épuiser le missile. Le problème se pose d'ailleurs avec plus d'acuité face aux chasseurs de 5^{ème} génération, qui allient une capacité de super-croisière à la furtivité, facilitant les manœuvres évasives. L'utilisation du statoréacteur permet, sur un intercepteur compact, de résoudre le problème de la manœuvre évasive mais aussi d'optimiser la probabilité d'interception, le missile gardant une capacité de prise de facteur de charge très supérieure à celle de l'aéronef.

L'intégration de ce type d'intercepteur dans une architecture radar distribuée, qui permet de rafraîchir les données du missile durant le vol, laisse envisager une logique de défense aérienne intégrée (IADS) plus performante que celles actuellement existantes, et une capacité de projection de la bulle de défense aérienne très en avant du front des opérations.

3 – Problématiques technologiques

3.1 – *Extrapolation du modèle Meteor*

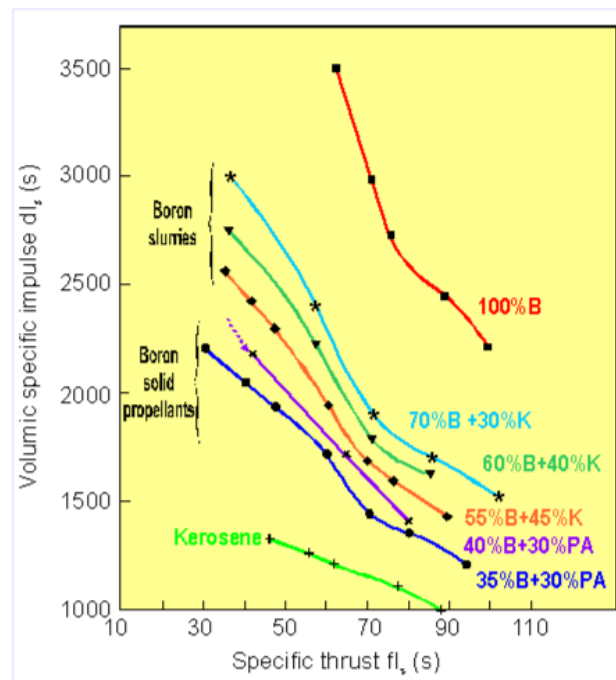
Une partie non négligeable du concept futur d'intercepteur pourrait être extrapolée à partir du missile air-air Meteor, récemment entré en service opérationnel. Celui-ci présente plusieurs innovations technologiques qui seront assez probablement reproduites, au niveau de la propulsion mais aussi au niveau des systèmes de gestion de vol.

Au niveau des propulsions, le choix d'un carburant solide au bore, retenu pour le Meteor, représente une option possible pour alimenter un statoréacteur haute performance. Bien que plus complexe à injecter dans la chambre de combustion qu'un carburant liquide, le propergol devant être vaporisé, ce type de carburant est nettement plus énergétique que les carburants liquides traditionnels (de type kérosène) et permet de

maintenir de très hautes vitesses sur un temps long (environ 1,2 km/s pour 100 km de portée sur le Meteor).

L'utilisation des carburants évolués solides permet également de faire varier leur valeur énergétique, en fonction des liants utilisés ou de l'ajout d'additifs énergétiques. Au fur et à mesure de l'évolution des technologies, il est possible d'améliorer le rendement du carburant et ainsi de diminuer la masse emportée, d'accroître la portée ou la vitesse de l'intercepteur voire de réguler celle-ci sur une plus large gamme. Le graphique ci-dessous met clairement en évidence l'intérêt des propergols au bore, nettement plus énergétiques que le kérosène, mais dont la valeur énergétique peut également être augmentée, en fonction de la maîtrise des combustions au sein de la chambre du statoréacteur¹⁶.

Figure n° 7 : VALEUR ENERGETIQUE COMPAREE DE PROPERGOLS AU BORE ET DU KEROSENE



L'apport des technologies de propulsion du Meteor ne se situe cependant pas uniquement dans l'utilisation de carburants plus énergétiques. Les changements d'altitude, de vitesse et d'incidence de l'intercepteur sol-air rendant la combustion complexe, l'optimisation du rendement du moteur peut être obtenue – en simplifiant – par une variation de l'arrivée d'air dans la chambre de combustion mais aussi par une variation du rapport

¹⁶ Paul Kuentzmann et François Falempin, *Ramjet, Scramjet & PDE, An Introduction*, présentation donnée à l'occasion du colloque « Chimie et Propulsions » organisé par la Fondation de la Maison de la Chimie à Paris le 20 mars 2002 (https://www.onera.fr/sites/default/files/ressources_documentaires/cours-exposes-conf/ramjet-scrumjet-and-pde-an-introduction.pdf)

oxygène / carburant lors de la combustion. Cette technique, appliquée sur le missile air-air Meteor, par l'intermédiaire de l'EPCU (*Electronics and Propulsion Control Unit*), permet d'adapter plus précisément les flux d'air entrants et la diffusion gazeuse du carburant dans la chambre du statoréacteur en fonction du régime souhaité. Il ne s'agit cependant que d'une solution partielle, l'EPCU visant avant tout à optimiser la gestion de la propulsion afin de gagner en portée. Un futur intercepteur devra disposer d'un système de gestion autrement plus complexe, capable de prendre en compte les multiples variations des écoulements, des ondes de choc et de la combustion résultant des changements d'attitude de l'engin, sous peine de voir le rendement de la propulsion s'altérer.

La conception d'un tel statoréacteur est dépendante d'un très important travail de modélisation et de simulation, poursuivi depuis de très nombreuses années en Europe et en France, l'ONERA et MBDA travaillant depuis plus d'une vingtaine d'années sur des modèles évolués. L'intérêt d'un tel travail dépasse cependant le seul développement d'un intercepteur et impacterait positivement l'ensemble des études sur les plates-formes réutilisables.

Le modèle Meteor sera également reproduit dans le domaine des liaisons entre le missile, les capteurs et la cible. Le Meteor utilise des liaisons montantes et descendantes lui permettant de s'appuyer sur les architectures externes (actuellement l'avion porteur, mais à terme d'autres capteurs pourraient être exploités) pour sa navigation et son guidage vers la cible. Le missile est par ailleurs capable de notifier au système d'arme l'activation de ses capteurs terminaux. Il est à anticiper que cette relation étroite entre la cible, le missile, le système d'arme et les architectures externes sera amenée à se renforcer, plus particulièrement dans le cadre du déploiement d'architectures fortement distribuées, capables de fournir des pistes composites de grande qualité à l'intercepteur. Si cette approche relève de l'évidence pour la navigation, il reste à évaluer si elle est reproductible dans la phase de guidage terminal, notamment face à des cibles hautement manœuvrantes. Du fait des vitesses considérées, les latences dans les transmissions de données et la mise en cohérence de ces dernières peuvent présenter des obstacles difficilement surmontables.

3.2 – Recherches matériaux et capteurs pour missiles à très haute vitesse

L'allègement des structures est un moyen simple et efficace pour accroître la vitesse et la portée des missiles. En dépit des efforts constants réalisés sur le travail des matériaux composites, les structures en alliages restent assez fortement utilisées. Toutefois, l'augmentation des vitesses impose l'utilisation plus systématique de matériaux résistant à l'échauffement. Les intercepteurs ne pouvant utiliser de matériaux ablatifs, l'emploi de matériaux composites à matrices céramiques (CMC) devra être privilégié, ce type de matériaux offrant une bonne tenue mécanique et une forte résistance thermique (I 200

à plus de 2 000 degrés en fonction des types de CMC). Déjà utilisés pour les radomes de missiles (transparence aux ondes électromagnétiques), ces matériaux devront être plus systématiquement exploités pour les structures (bord d'attaque, entrées d'air, chambre de combustion, pièces mobiles). Des travaux sont actuellement poursuivis en Europe et notamment par l'ONERA sur des CMC obtenus à partir de précurseurs organométalliques pour des pièces de futurs effecteurs hypersoniques, sur des CMC oxyde-oxyde visant à remplacer les pièces en titane et sur des éléments transparents permettant la protection des optiques à très hautes températures. L'un des grands enjeux cependant est d'abaisser les coûts de production par l'utilisation de CMC moins spécialisés, tels que les carbures de silicium, qui présentent des caractéristiques de tenue thermique ou mécaniques suffisantes, mais dont le coût de production est nettement plus faible. De très nombreux problèmes restent cependant à surmonter, notamment parce que les très hautes températures atteintes altèrent la tenue mécanique des matériaux composites, pouvant provoquer jusqu'à des ruptures. Dans nombre de cas, la combinaison des alliages et des matériaux céramiques reste la seule solution, notamment pour résoudre les problèmes liés à la dilatation des matériaux.

Comme cela a été souligné pour la modélisation de la propulsion, il est très probable que le développement de matériaux composites adaptés aux statoréacteurs de très haute performance soit également une étape indispensable avant le développement d'avions hautement supersoniques militaires ou civils. Ces engins en effet ne peuvent être produits que si les matériaux utilisés présentent un très haut niveau de sûreté à un coût acceptable, que seule la recherche sur des composants de très haute technicité peut garantir. Ces études matériaux sont également un préalable nécessaire au développement des technologies hypersoniques.

La question des matériaux se pose également en matière de capteurs, l'allongement des portées de détection conduisant à augmenter fortement la puissance des radars actifs sur des antennes de très petite taille. Si les technologies AESA ont déjà permis des améliorations significatives, le doublement de la portée de détection nécessaire face à des cibles plus véloces induit une augmentation de puissance d'émission d'un facteur 16, que les composants électroniques actuels ne peuvent supporter. Parallèlement, si le choix d'une combinaison entre un capteur passif infrarouge et un capteur actif électromagnétique devait être retenu, la combinaison des deux capteurs sur une même unité de détection pose des problèmes d'intégration non négligeables, puisqu'il n'est pas judicieux de déporter les deux capteurs (capteur axial et capteur latéral, solution retenue sur le RIM-116 mais qui réduit le champ de vue commun) et que les deux capteurs devraient également être montés sur cardan, afin d'élargir le champ de détection.

Les limites mécaniques et physiques peuvent toutefois être compensées, notamment par l'adoption de lois de guidage proportionnel évoluées, qui, en améliorant l'anticipation du

positionnement de la cible, atténuent la dépendance vis-à-vis des performances du capteur terminal.

3.3 – Algorithmie et intelligence artificielle

La très grande complexité des propulsions aérobies hautement supersoniques ou quasi hypersoniques dans un environnement complexe pose la question de l'emploi possible de l'intelligence artificielle en complément des algorithmes actuellement utilisés pour gérer l'ensemble des sous-systèmes et les différents paramètres de vol. En effet, le missile doit être à même d'adopter le profil de vol le moins dommageable pour la structure comme pour le fonctionnement du moteur, tout en optimisant sa trajectoire pour engager la cible et en définissant les points de rencontre potentiels avec celle-ci. En l'état, il est difficile d'établir si l'algorithmie traditionnelle permettra de gérer ces paramètres, ou s'il faut envisager une logique d'intelligence artificielle, à base de *machine learning* par exemple, afin que celle-ci soit capable d'adapter le comportement général de l'intercepteur en fonction des paramètres uniques de chaque mission. On peut supposer qu'une telle approche permettrait d'élargir considérablement le domaine d'interception, plus particulièrement sur des engagements très tardifs qui solliciteraient l'engin aux limites de ses domaines physiques. D'autre part, compte tenu de la diminution drastique des temps d'engagement, il est plus que probable que le tir du missile se réalisera au sein d'une architecture s'appuyant elle-même largement sur des techniques d'intelligence artificielle, qui détermineront non seulement les modalités d'interception mais aussi la capacité d'un engin à réaliser cette interception en fonction de ses caractéristiques propres. Si l'intégration de l'intelligence artificielle dans les systèmes d'arme est évidemment déjà largement envisagée par l'industrie missilière, la gestion du domaine de vol d'un statoréacteur très hautes performances représente un défi considérable, du fait de la très grande complexité des paramètres à prendre en compte.

3.4 – Propulsions alternatives

Bien que peu abordées dans les parties précédentes, les problématiques liées aux limites des statoréacteurs, comme des super-statoréacteurs, aux altitudes supérieures à 30 km doivent laisser anticiper l'adjonction à l'étage propulsif principal d'un véhicule d'interception terminal, propulsé par des propergols anaérobies, afin d'engager les cibles à très haute altitude (30 km et plus). Il s'agit pour l'essentiel de donner aux intercepteurs une capacité élargie sur des altitudes plus hautes sans néanmoins chercher à émuler les possibilités offertes en zone haut endo-atmosphérique par des intercepteurs de type THAAD, dont la logique d'interception est différente et mieux adaptée à ces domaines.

Dans l'état actuel des développements, un véhicule d'interception terminal sera propulsé par un propergol solide classique, le but étant avant tout de disposer d'une impulsion supplémentaire afin d'atteindre la cible à des altitudes ou à des angles d'incidence où le statoréacteur perd de son efficacité. Toutefois, il peut être envisagé de développer un véhicule terminal capable de soutenir un vol plus long à des vitesses élevées pour atteindre des cibles situées sensiblement plus haut que l'intercepteur. Ce type de profil d'interception pourrait viser des planeurs hypersoniques mais pourrait également être étudié pour les interceptions de missiles balistiques en phase propulsée ou ascendante (BPI/API¹⁷). En effet, dans l'état actuel des choses, la mise en œuvre d'intercepteurs BPI/API reste ardue du fait de la difficulté de conception d'un intercepteur très vélocé, capable de rejoindre sa cible en quelques minutes et d'engager la cible avec des angles d'incidence élevés tout en pouvant être emporté par un avion ou un drone patrouillant à une distance raisonnable de sa cible. L'impossibilité de concevoir des intercepteurs hypervélocés compatibles avec ce type de plateforme impose de développer des intercepteurs certes plus lents mais nettement plus légers, pouvant être portés par des appareils pouvant patrouiller au plus près des cibles. Les États-Unis, qui se sont intéressés à ce principe dans les années 2000 (programme NCADE), ont récemment relancé des études pour exploiter les capacités de pénétration du F-35 et évaluer l'emploi sur drones.

Si le statoréacteur permet d'envisager des intercepteurs BPI/API relativement légers pouvant être déployés sur drone ou sur un avion de chasse pour engager des SRBM ou des MRBM, la montée en altitude de la cible suppose le développement d'un véhicule terminal anaérobie capable de soutenir un vol propulsé à des altitudes élevées, sans que sa masse obère significativement les performances du premier étage. Une solution possible semble émerger autour des ergols verts, sur lesquels des recherches intensives sont poursuivies dans le domaine spatial, afin de les substituer à l'hydrazine et ses dérivés. Actuellement, les expérimentations sont très avancées sur les ergols de type nitrate d'hydroxylammonium (HAN) et dinitramides d'ammonium (DNA), plus énergétiques que les propergols solides. Bien que l'adoption d'une propulsion liquide présente des désavantages en termes de masse du propulseur (pompes, injecteurs, système d'allumage) et de matériaux (très hautes températures dans la chambre de combustion notamment), l'augmentation de poussée obtenue pourrait permettre de compenser l'accroissement de masse mais aussi d'offrir une plus grande souplesse d'emploi durant la phase propulsée du véhicule intercepteur terminal, la poussée pouvant facilement être ajustée.

Si l'application des technologies des ergols verts à la propulsion de missiles de petit diamètre ne semble pas immédiatement réalisable, du fait des contraintes de masse et

¹⁷ *Boost Phase Intercept* et *Ascendent Phase Intercept*, c'est-à-dire interception lorsque le missile balistique est encore dans sa phase de propulsion ou immédiatement après la fin de la propulsion.

de la complexité d'emploi, les États-Unis ont testé sans succès réel l'emploi d'un second étage sur l'AMRAAM, afin d'évaluer la faisabilité d'un intercepteur BPI classique (programme NCADE). Depuis, l'intérêt du secteur spatial pour le développement de ces ergols, plus énergétiques, plus sûrs et moins polluants que l'hydrazine, a permis des évolutions notables, sur les ergols comme sur la miniaturisation des éléments de propulsion. Ces progrès pourraient donner plus de pertinence à un concept type NCADE, adossé à un élément propulsif plus performant que celui de l'AMRAAM, de type statoréacteur. À plus long terme, ces technologies pourraient être exploitables pour définir de nouveaux intercepteurs, les États-Unis ayant déjà envisagé cette possibilité dans le cadre du programme SM-3.

4 – Applications industrielles et civiles

La conception d'un intercepteur de nouvelle génération, élaboré autour de nouvelles technologies, est un défi, qui représente un risque opérationnel mais aussi financier. De nombreux exemples démontrent que des choix technologiques de rupture n'ont finalement eu que des applications opérationnelles limitées, le système d'arme pouvant se révéler trop cher, trop spécialisé ou les technologies trop immatures pour être pleinement exploitées. Nombre de cas montrent que la rupture technologique n'apporte qu'un gain de performances marginal, gain que des systèmes d'arme moins évolués compensent par un coût d'acquisition très inférieur ou par une plus grande flexibilité opérationnelle.

À l'inverse, certaines ruptures ont eu un impact considérable, générant des familles de systèmes d'armes sur plusieurs décennies et offrant à l'État qui les avait développées des avantages opérationnels substantiels. L'un des exemples les plus manifestes est représenté par le missile de croisière qui, lors de son développement dans les années 1970, combine un ensemble d'évolutions technologiques et d'innovations sur un même système d'arme, plus particulièrement au niveau des propulsions, de la navigation et du guidage terminal, capitalisant sur un savoir-faire acquis mais encore peu exploité (turbo-propulseurs à double flux) et sur l'intégration de technologies de pointe (GPS, systèmes de corrélation d'image). Arme de rupture, le missile de croisière n'en reste pas moins un engin économique et polyvalent, caractéristiques spécifiques qui permettent aux forces américaines d'en élargir progressivement l'emploi, transformant un engin stratégique très spécialisé en munition exploitable pour tous types d'opérations.

Le cas du missile de croisière met en évidence deux paramètres importants :

- ➔ d'une part, définir précisément la mission du système futur est essentiel. La finalisation d'un projet majeur n'est réalisable que si le besoin est clairement exprimé mais aussi soutenu, aussi bien par les concepteurs que par les autorités militaires et politiques. Il est donc nécessaire qu'un certain consensus

existe – ou soit organisé – autour de son développement, consensus d'autant plus facile à obtenir que le système répond à une demande forte ou répond à une menace identifiée contre laquelle les défenses existantes sont mal adaptées ;

- ➔ d'autre part, les projets portant sur le développement de systèmes d'arme conventionnels doivent être budgétairement abordables. Sauf exception, la maîtrise des coûts est un paramètre essentiel, qui favorise l'acquisition mais aussi l'évolution du système d'arme en famille de systèmes et permet in fine la réalisation d'importantes économies d'échelle.

Limiter les coûts d'un engin offrant une capacité opérationnelle nouvelle impose le plus souvent de capitaliser sur des technologies disposant d'une certaine maturité, mais qui offrent encore un fort potentiel de développement et pour lesquelles l'investissement en recherche et développement est suffisant pour laisser anticiper des évolutions de performance significatives. Le statoréacteur répond assez précisément à cette définition, l'évaluation des performances à envisager étant basée sur l'expérience existante, alors que la technologie fait l'objet d'un investissement constant de recherche et développement, plus particulièrement depuis la fin des années 1990. Le Meteor permet de surcroît de calibrer un certain nombre de contraintes potentielles et de s'appuyer sur des solutions technologiques innovantes mais déjà opérationnelles que le déploiement du missile au sein des forces permettra d'affiner.

Reste que les enjeux de développement d'un intercepteur opérant aux limites des vitesses hypersoniques imposent de penser son développement au-delà de l'industrie de défense. L'importance de l'effort de recherche demandé sur les matériaux, sur la modélisation et la simulation, sur l'algorithmie et l'intégration probable d'éléments d'intelligence artificielle doivent conduire les industriels à rechercher des synergies avec la recherche civile, mais aussi à évaluer les retombées potentielles de leurs activités sur les marchés de défense comme sur les marchés civils.

Le développement des statoréacteurs présente des opportunités majeures pour l'aviation militaire, le transport aérien, voire le transport spatial. Associé à une turbine haute performance dans un moteur à propulsion combinée, le statoréacteur laisse envisager la production de plates-formes de combat très véloces, capables de soutenir des vols supersoniques sur des périodes longues. Parallèlement, la mise au point d'avions de transport supersoniques, qui apparaît plus probable que celle des transports hypersoniques régulièrement évoqués dans les médias, devrait s'appuyer sur le même type de propulsion combinée, plus particulièrement si les problématiques de rejet de CO₂ et de consommation de carburant imposent au secteur aérien de penser la transition en termes de propulsion. L'utilisation plus systématique du statoréacteur peut ainsi permettre de

concevoir une première génération d'appareils supersoniques ou hautement supersoniques, répondant d'abord à un besoin de niche mais laissant entrevoir un nouveau marché pour le transport à haute vitesse.

Il existe de fait une forte communauté d'intérêt entre les industries aéronautiques civile et militaire dans le développement de telles propulsions, mais aussi avec l'industrie spatiale. En effet, si des progrès rapides ont été réalisés sur les lanceurs chimiques réutilisables, des recherches systématiques sont poursuivies depuis la fin des années 1990 sur les propulsions combinées, afin de concevoir des engins permettant la mise à poste de microsatellites en orbite basse à la demande, via un avion spatial. Ce segment particulier, qui reste associé à des besoins militaires encore très spécifiques, ne peut néanmoins être ignoré, l'accès aux orbites basses présentant un intérêt croissant en termes d'observation mais aussi de communication – notamment en relation avec les engins hypersoniques – alors que les concepts de micro-constellations déployées à la demande tendent progressivement à se matérialiser.

La conjonction de ces ambitions technologiques, très spécifiquement orientées vers la maîtrise des systèmes très véloces, a évidemment un impact industriel plus que potentiel, notamment en matière de conception et de production de matériaux composites. L'impact sur le transport aérien civil doit être étudié de près, puisqu'il induit un contrôle des coûts de développement et de production mais également des contraintes fortes de sûreté. Les avancées réalisées au niveau de la recherche militaire peuvent donc avoir des retombées sensibles, plus particulièrement si l'on considère que la recherche sur la production d'un statoréacteur de haute performance à coût maîtrisé conduira à utiliser des matériaux composites classiques, tels que les carbures de silicium, mais développés aux limites de leurs performances thermiques et mécaniques, offrant des marges de sécurité intéressantes pour des utilisations civiles moins contraignantes.

Cette conjonction d'intérêts se retrouve, à une échelle moindre, dans le développement des ergols verts. Certes, leur utilisation de court terme pour l'industrie missilière n'est pas impérative, les propulsions solides offrant des solutions viables, du moins tant que la mission des futurs intercepteurs ne sera pas élargie à l'engagement de menaces différentes de celles envisagées actuellement. Toutefois, l'industrie spatiale, poussée par l'évolution des normes écologiques, investit de plus en plus massivement dans ces technologies, investissement qui pourra être exploité par la suite par l'industrie militaire. Au fur et à mesure de la maîtrise des technologies, sur les ergols mais surtout sur les moteurs, ces ergols sont très susceptibles de transformer les approches traditionnelles en matière de propulsion, en réintroduisant la propulsion liquide comme une option sûre et viable pour une large gamme de moteurs, du lanceur spatial à l'intercepteur hautes performances. L'interaction déjà largement expérimentée entre industrie spatiale et industrie missilière est donc très susceptible de se reproduire ici, permettant des fertilisations croisées qui bénéficieront aux deux secteurs.

Cette logique n'est pas forcément applicable en matière d'algorithmie et d'intelligence artificielle, le développement de la recherche civile étant susceptible de générer des avancées majeures que l'industrie de défense ne pourrait que partiellement suivre et qu'elle pourrait être contrainte d'intégrer. S'il est évident que les algorithmes développés pour gérer un missile quasi hypersonique et les intelligences artificielles conçues pour gérer des systèmes militaires diffèrent des modèles actuellement développés par l'industrie civile et qu'une certaine étanchéité demeurera entre les deux approches, il existe des synergies manifestes, déjà exploitées par les industries civiles se positionnant sur le segment militaire. L'Europe ne disposant pas des ressources américaines ou chinoises en la matière, qui s'appuient sur un secteur militaire puissant mais aussi sur une industrie civile à la pointe de la recherche, il est probable qu'elle doive organiser le développement de ces technologies en favorisant les interactions entre les secteurs militaire et civil, sous peine de devoir dépendre assez rapidement de systèmes étrangers, qu'elle ne contrôle pas et qu'elle ne saura pas reproduire. Si l'industrie missilière ne représente qu'un élément marginal de cette problématique, il n'en demeure pas moins qu'elle dispose des ressources humaines et technologiques suffisantes pour s'intégrer à une logique de développement civilo-militaire et peser sur ces évolutions.