

Drone hypersonique pour des missions de reconnaissance en profondeur

L.Serre

Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
BP 72
92322 Châtillon
France

1. Sommaire

Le concept d'emploi d'un drone hypersonique évoluant à très haute altitude est analysé. On montre que sa mise en oeuvre ouvre la voie à une importante classe d'information qui est difficilement accessible par d'autres moyens. On montre également que le choix des senseurs est fortement couplé avec le dimensionnement du véhicule, et doit, à ce titre, être pris en compte dès le stade de l'avant-projet pour finaliser les grandes options.

2. Introduction

Les applications actuellement revendiquées pour les drones visent le plus souvent le renseignement tactique sur le champ de bataille, ou la surveillance sur zone frontière en stand-off. Ces concepts subsoniques sont assez vulnérables, et ne disposent pas de capacités de pénétration suffisantes pour survoler des zones profondes bien défendues.

En revanche, un véhicule hypersonique dispose par nature de ces capacités, qui le démarquent sensiblement des autres systèmes.

Pour préciser son potentiel d'emploi dans le domaine stratégique, nous proposons de distinguer le renseignement statique et le renseignement dynamique, selon le rapport de chacun d'eux avec le temps (durée d'acquisition et d'exploitation, durée de vie de l'information, capacité de rendez-vous, effet de surprise, permanence en vol...).

L'analyse des missions correspondant à cette classification, menée en examinant les capacités offertes par les moyens actuels (drone tactiques, HALE, avions de reconnaissance, satellites) fait apparaître des besoins non couverts pour lesquels un drone hypersonique pourrait constituer un atout significatif.

3. Besoins généraux pour le renseignement stratégique

3.1. Nature de l'information stratégique recherchée

L'intérêt présenté par les grandes vitesses dans le domaine de la reconnaissance stratégique peut être tout naturellement abordé d'une manière globale par l'analyse des échelles de temps mises en jeu, qui peuvent évoluer entre quelques minutes et quelques mois. Cette analyse fait apparaître deux grandes classes d'informations stratégiques, que nous appellerons *statiques* et *dynamiques*.

3.1.1. Renseignement Stratégique Statique

Le recueil du renseignement stratégique statique relève d'une action de fond, qui a pour but d'engager des actions de planification à moyen et long terme. Élément de décision pour les états-majors et les politiques, l'information est généralement mise en forme de manière à présenter une situation (militaire, industrielle, économique), et qui pourra être actualisée périodiquement sous forme synthétique.

Elle permet notamment l'établissement de cartes thématiques:

- réseaux de communication (télécommunications, routes, hydrographie, ponts, voies ferrées, gares)
- énergie (centrales, raffineries, réseaux de distribution)
- sites militaires (aéroports, site radar, site missile, dépôts de carburant ou de munitions)
- sites industriels (usines, centres de recherche)
- modèles de terrain (altimétrie)
- cartes géographiques et économiques (culture, eau, forêt, ville)

Pour présenter une information de haut niveau, souvent issue de la fusion de sources multiples (images multi-bande, multi-résolution, multi-date, écoute électromagnétique, donnée exogène), les temps de traitement sont assez importants. Les évolutions à analyser sont relativement lentes. La durée de pertinence des informations se chiffre au minimum en semaines, et le plus souvent en mois. La mise à jour concerne l'ensemble du territoire, et traite des objets de taille assez importante, pour lesquels des résolutions comprises entre 1 et 30m sont suffisantes.

Les satellites sont bien adaptés pour fournir ce type de renseignements, tant dans le domaine de l'imagerie que pour l'écoute électromagnétique. Toutefois, la persistance de la couverture nuageuse sur certaines zones géographiques, qui peut atteindre 70% en centre Europe, pénalise les systèmes passifs travaillant dans le visible, l'infrarouge proche, ou l'infrarouge thermique.

3.1.2. Renseignement Stratégique Dynamique

Une deuxième classe d'information concerne des événements beaucoup plus brefs, d'une durée de pertinence de quelques jours à quelques minutes. L'aspect dynamique dépend fortement de la mission.

Recueil de preuves: la mission consiste à obtenir des informations ayant valeur de preuve dans le cadre du respect de traités (non prolifération chimique ou nucléaire par exemple), et fournissant des éléments de négociation auprès des instances internationales. Son succès dépend de la capacité du système à se trouver au rendez-vous d'un événement qui peut être de courte durée, dont on aurait connaissance par un moyen externe. Il suppose des capacités tous temps, une présence sur site imprévisible, une disponibilité immédiate, et des résolutions au sol mieux que métriques.

Analyse des forces et de leurs mouvements: au niveau stratégique, on s'intéresse à l'activité en profondeur derrière les lignes de front ou de frontière. L'attention se porte sur les axes de communication, qui suppose des capacités de former la trajectoire du véhicule. Une analyse quantitative et qualitative requiert des résolutions comprises entre 30cm et 4m environ. Le suivi des mouvements impose des rafraîchissements fréquents (au moins quotidiens).

Préparation d'attaque au sol à grande distance: dans le cadre d'une attaque au sol, l'acquisition d'une image de la cible (ou des zones prévues pour les recalages) dans des conditions proches de celles de l'attaque, favorise grandement la précision de la navigation et du guidage terminal. Les données à recueillir sont peu nombreuses, mais doivent être exploitées sans délai, pour que l'attaque ait lieu avant toute dégradation de l'information. Les contraintes à respecter concernent les senseurs (même nature d'information pour la reconnaissance et l'attaque), la capacité de suivre une trajectoire, la géométrie des prises de vue (latérales ou verticales pour la navigation, frontales pour un recalage terminal).

Surveillance: la mission consiste à détecter les mouvements anormaux aux abords du territoire à défendre, et à écouter fonctionner les différents réseaux de télécommunication. L'intérêt débute en zone frontalière et se prolonge jusqu'au cœur du territoire. Sont principalement concernés la détection de cibles au sol ou aériennes, le départ de missiles balistiques, les communications de commandement, la localisation des radars.

Analyse du réseau de défense pendant l'agression: en période de crise, lorsqu'un avion, un missile ou un drone pénètre sur le territoire adverse, il est pris en charge par les systèmes de défense. L'analyse de leur comportement peut fournir de nombreux éléments concernant les performances de détection (passage de la veille à la poursuite, mise en oeuvre des conduites de tir). Des éléments intimes du système de défense sont alors accessibles pendant de brèves périodes d'alerte, par exemple lors de l'intrusion d'un véhicule rapide équipé de moyens d'écoute.

Ces informations à caractère dynamique peuvent être exploitées immédiatement ou en différé selon le cas, mais elles ont en commun de posséder au moins un temps caractéristique court.

Pour les renseignements de type image, on s'intéresse à des zones géographiques de faibles dimensions pour lesquelles on disposera souvent déjà de cartes renseignées. Les missions seront généralement dédiées à l'analyse d'un site particulier, sur lequel on recherchera une description aussi fine que possible.

4. Potentiel des systèmes d'observation et d'écoute en contexte stratégique

4.1. Systèmes "classiques"

4.1.1. Drones HALE

L'endurance permet une mise à poste de longue durée sur un site à surveiller. Elle est également exploitée pour rallier des zones d'intérêt qui sont très éloignées du point d'origine sans nécessiter un transport.

La haute altitude permet d'observer un domaine au sol de grandes dimensions, et en particulier de traiter simultanément plusieurs cibles éloignées les unes des autres. Elle permet également de minimiser les interférences avec les opérations aériennes qui se déroulent plus bas. Enfin, elle place le véhicule hors de portée des moyens d'interception sol/air classiques. Toutefois, ces véhicules subsoniques qui évoluent à moins de 28000m et qui sont peu manœuvrants demeurent assez vulnérables face à des missiles air/air tirés depuis un avion d'interception haute altitude.

Malgré les portées très importantes qui peuvent être atteintes, les faibles capacités de pénétration des drones HALE leur réservent donc un emploi stratégique privilégié dans le domaine de l'observation à distance de sécurité:

- détection de missiles balistiques
- surveillance des mouvements des forces aux abords du territoire
- écoute électromagnétique

Ces systèmes ne couvrent pratiquement pas les besoins en imagerie haute-résolution impliqués par le renseignement stratégique dynamique. Ils ne permettent pas davantage l'étude des émissions issues des défenses situées autour d'un objectif profond.

4.1.2. Avion de surveillance subsonique

Les avions de surveillance sont destinés à des missions de même type que les drones HALE en stand-off, en opérant toutefois à altitude beaucoup plus basse. La portée des systèmes d'écoute (horizon radioélectrique) est donc plus réduite. En contrepartie, la grande capacité d'emport de ces avions permet d'analyser simultanément de nombreuses bandes de fréquence, et de traiter à bord les signaux recueillis. Ceux-ci peuvent alors être exploités immédiatement pour orienter la suite des recherches sur un domaine présentant une activité particulièrement intéressante.

4.1.3. Satellites

Les systèmes à base de satellites d'observation sont très bien adaptés pour le recueil du renseignement stratégique "statique". Ils permettent des acquisitions régulières sur toute zone du globe avec des résolutions fines en SAR ou en optique, en s'affranchissant totalement des contraintes liées aux interdictions de survol.

Les meilleures résolutions ne sont toutefois envisageables que dans le domaine optique pour lequel il faut, dans certains cas (notamment en centre Europe), attendre plusieurs semaines avant d'obtenir des conditions de prise de vue satisfaisantes (présence du satellite et ciel suffisamment dégagé). Les zones sur lesquelles il est possible d'obtenir de fréquents rafraîchissements sont encore plus rares.

L'emploi de SAR sur un satellite permet, outre l'aspect tous temps, d'exploiter pleinement le concept d'antenne synthétique grâce aux très grandes vitesses de déplacement (>7500m/s). Néanmoins, la haute altitude tempère cet avantage de vitesse, car elle dégrade la résolution Doppler en réduisant les vitesses de défilement angulaire de la scène. Les grandes distances d'observation (hautes altitudes) imposent en outre des puissances installées importantes (système à imagerie active), pénalisant ensemble la masse, la durée de vie et le coût de lancement.

Enfin, les satellites sont faciles à détecter, et leurs trajectoires obéissent à des lois assez simples de sorte que leur présence est souvent prévisible. Une organisation rigoureuse doit permettre de mener des opérations au sol qui soient discrètes vis à vis de l'observation spatiale.

Les missions impliquant une capacité de rendez-vous et de très hautes résolutions (recueil de preuves, analyse détaillée des cibles), ou une courte période de revisite (mise à jour des mouvements des forces au sol) ne sont pas correctement remplies par ces systèmes.

4.1.4. Avion de reconnaissance supersonique

La présence d'un ou plusieurs pilotes dans l'avion impose des contraintes très lourdes sur le véhicule. Le véhicule doit donc être conçu pour être pratiquement invulnérable, au moins contre des défenses conventionnelles (moyens air/air ou sol/air non nucléaires).

Dans le même esprit, la fiabilité de l'avion doit être excellente pour éviter une panne grave en cours de mission. Ceci impose de nombreuses redondances (notamment concernant la motorisation).

La grande taille de ce type d'avion offre des avantages importants en terme de capacité d'emport et de traitement. Elle permet également la mise en place d'antennes aux extrémités de l'appareil: la grande taille du réseau ainsi constitué est très favorable à la précision de localisation des sources au sol. De même, la taille des optiques permettant d'obtenir les hautes résolutions souhaitées ne pose plus de problème d'intégration dans l'appareil.

Le concept possède potentiellement les qualités requises pour les missions de renseignement en profondeur. L'aspect furtivité en croisière doit être correctement pris en compte si on veut assurer la mission "recueil de preuve" en bénéficiant au mieux de l'effet de surprise. En revanche, l'emploi de systèmes actifs d'imagerie (Laser, SAR) ne pénalisent pas la mission car il ne révèle la présence du système que pendant l'acquisition des données.

Dans le cas de très grandes vitesses ($M=4$ à 6), la motorisation constitue également un point délicat à traiter, car elle doit aussi assurer le fonctionnement à basse vitesse (décollage et atterrissage).

Les coûts très élevés constituent le principal obstacle à ce type de programme.

4.1.5. Drone ou avion furtif subsonique

Ces concepts cherchent à exploiter au mieux la furtivité (radar, infrarouge, acoustique) pour pouvoir approcher des objectifs à une distance telle qu'elle permette une acquisition à haute résolution. L'approche à basse altitude permet de tirer profit du fouillis de sol et du relief.

Du point de vue des senseurs, le vol en suivi de terrain pourrait permettre d'approcher les capacités tout-temps sans recourir au radar. L'essentiel du couvert nuageux se trouve au dessus de la ligne de visée, de sorte que l'utilisation de senseurs visibles ou infrarouges semble moins limitée par l'absorption atmosphérique que depuis la haute altitude.

Cependant, plusieurs arguments peuvent être opposés à ce concept.

a - Il ne semble pas possible d'obtenir une pénétration réellement profonde sans une phase initiale à une altitude plus élevée qui permet de réduire les consommations de carburant et d'obtenir la portée requise. L'avion se trouve alors vulnérable pendant une durée assez longue, et l'interception dans cette phase pourrait demeurer assez aisée, d'autant que la recherche de la furtivité n'est pas très favorable aux performances aérodynamiques, en particulier en ce qui concerne la manoeuvrabilité.

b- Malgré une excellente furtivité et un vol en suivi de terrain, les seuils de détection des systèmes de défense ne devraient pas permettre le survol direct d'une cible défendue. Les prises de vues seront donc nécessairement rasantes si on ne tolère pas une excursion importante en altitude. On voit mal comment une telle image pourrait correctement décrire l'activité d'un site industriel, compte tenu des effets de masquage par les arbres, le relief, ou les bâtiments entre eux.

c- L'intégration des senseurs doit faire l'objet d'un soin extrême pour maintenir la SER à son plus faible niveau dans les directions sensibles. Les niveaux de SER déterminent directement les performances du concept et peuvent constituer une source de risque technologique.

Si l'utilisation d'un drone ou d'un avion furtif pour le recueil d'images à haute résolution présente un certain nombre d'avantages liés essentiellement à la possibilité d'approcher un objectif d'assez près, on constate qu'une analyse plus détaillée des missions à réaliser fait surgir de nombreuses limitations d'emploi.

4.2. Missions de base pour les drones hypersoniques

Les systèmes que nous venons d'évoquer ne permettent de répondre que partiellement aux besoins exprimés dans le domaine du renseignement stratégique. Pour la plupart des missions, les caractéristiques spécifiques des drones hypersoniques en font au minimum une alternative avantageuse:

- coût faible par rapport à un programme de type avion
- invulnérabilité face à pratiquement tout système d'arme
- non compromission garantie par l'absence de pilote, l'invulnérabilité, et éventuellement une désintégration haute altitude en cas de panne
- capacité de rendez-vous en temps et en espace
- un délai d'arrivée sur site très réduit
- possibilité de survol direct pour obtenir des vues plongeantes successives permettant une reconstruction 3D

Recueil de preuve:

Cette mission consiste généralement à obtenir une prise de vue contenant l'information recherchée. Le drone hypersonique n'est pas contraint à des visées rasantes. L'aptitude à l'effet de surprise permet d'analyser l'activité en dehors des horaires de passage des satellites, et avec une meilleure résolution. Enfin, on peut envisager que le délai entre la connaissance d'une activité en cours sur un site éloigné de 1000 km et l'acquisition de la preuve de cette activité soit inférieur à 30 minutes.

Préparation d'attaque au sol:

La période de rafraîchissement du renseignement "statique" est assez importante (souvent plus de 6 mois). Pour la navigation autonome par imagerie radar d'un missile air/sol à très longue portée ou d'un missile de croisière subsonique en suivi de terrain, la recherche d'une bonne précision finale impose des recalages fréquents qui nuisent à la furtivité ou introduisent des contraintes de trajectoire (survol des régions pauvres en amers). Une imagerie réalisée juste avant la mission (quelques heures ou quelques minutes) favorise grandement la qualité des corrélations calculées pendant l'attaque, et accroissent la précision de la navigation. De même, lors du recalage terminal, il devient possible de désigner avec précision la cible dans une image presque identique à celle qui sera vue lors de l'attaque.

Surveillance et suivi des mouvements de force:

A la différence de la surveillance tactique qui implique la permanence sur zone, la surveillance stratégique concerne un niveau de décision plus global. Dans ce contexte, les drones hypersoniques permettent d'envisager un bilan de l'état d'activité de très nombreux sites simultanément. A titre d'exemple, un petit nombre de missions pourrait suffire à imager en quelques heures tous les régiments de chars. Cette mission requiert des capacités de stockage plus étendues que pour les autres missions.

Ecoute sur trajectoire pénétrante:

Cette mission s'oriente principalement vers l'écoute des systèmes de défense situés en profondeur dans le territoire. Leurs émissions ne peuvent en effet pas être captées depuis les frontières car elles se situent au-delà de l'horizon radioélectrique. Par ailleurs, les radars de poursuite fonctionnent essentiellement lors des intrusions, et pourraient rester assez discrets le reste du temps. Ainsi, les drones rapides se prêtent assez bien à des missions de survol des zones présumées être des sites radar, afin d'en confirmer la nature et d'identifier quelques caractéristiques (bande, mode, puissance...). Inversement, on peut également exploiter ces drones pour fournir une localisation approximative de sources radar nouvelles ou qui auraient échappé aux photo-interprètes dans les images satellitaires.

Aucune de ces missions n'imposent fondamentalement de pouvoir modifier la trajectoire en fonction des données recueillies. Elles s'accommodent bien de paramètres programmés, de l'absence d'un pilote, de capacités de traitement modestes, et de moyens de communication très réduits, voire inexistant.

5. Charges utiles pour la reconnaissance stratégique

Dans cette partie, nous analyserons les moyens d'imagerie passive (visible, IR) et active (SAR), puis l'apport de charges de type SIGINT pour les missions opérationnelles envisagées

5.1 Imagerie SAR

5.1.1 Recherche de performances tous temps

Les ondes radar ont la propriété d'être faiblement atténuées par l'atmosphère, ce qui permet d'envisager des performances tous temps. Ce point est particulièrement important en centre Europe, où le couvert nuageux limite très fortement l'utilisation d'imageurs dans le visible et l'infrarouge. La figure 1 donne des valeurs typiques d'atténuations dues à l'atmosphère en présence de précipitations, depuis les fréquences radar jusqu'au domaine visible (ref [1] page 8)

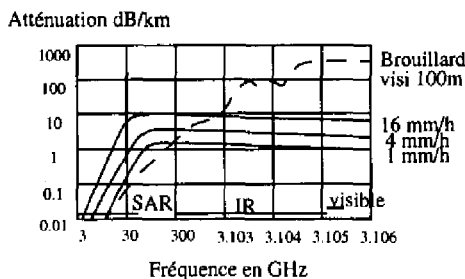


Fig 1: atténuation atmosphérique

L'atténuation augmente avec la fréquence des ondes radar, mais reste négligeable en atmosphère claire. Sur un trajet aller-retour oblique plongeant depuis une altitude de 30km, elle est en effet inférieure à 2 dB pour toute la gamme de fréquence de 1 à 35 GHz.[2]

L'intérêt du radar, déjà évident en présence de pluie, devient énorme en présence de nuages. Sur un parcours aller-retour traversant un nuage dense pendant 1km, on doit comparer 0.2dB au dessous de 30GHz avec plus de 200dB en IR proche et dans le visible.

5.1.2 Principe de l'antenne synthétique

L'ouverture d'un faisceau radar (qui détermine la résolution qui pourra être obtenue) est inversement proportionnelle à la taille de l'antenne. Pour des applications d'imagerie, la recherche de hautes résolutions passe par des antennes dont la taille excède largement celle des engins qui les emportent.

Le principe de l'antenne synthétique consiste à reconstituer par un traitement cohérent une antenne virtuelle dont la longueur est égale à la distance parcourue par le porteur pendant le temps d'illumination. Dans ces conditions, on perçoit nettement l'intérêt que peut offrir un drone évoluant à des vitesses élevées. En effet, à Mach 5, une durée d'intégration de 1.5s nous ramène, selon le calcul précédent, à une antenne équivalente de 2250m.

Les hautes vitesses constituent donc un facteur qui est favorable à l'obtention de hautes résolutions. Toutes choses égales par ailleurs, la résolution s'améliore avec le rapport entre la vitesse du porteur et l'altitude (défilement du sol qui détermine la résolution Doppler). Le tableau I donne des valeurs caractéristiques de ces paramètres, montrant potentiellement un facteur supérieur à 2 en faveur des drones hypersoniques par rapport aux satellites.

Tableau I	Z (km)	V (m/s)	V/Z
drone basse altitude	1	80	80
drone Hypersonique	30	1350	45
Satellites	400	7500	18.8
drone HALE	27	120	4.5

Sur un drone HALE, la recherche d'un renseignement en profondeur, derrière la ligne frontière, conduit ces derniers à opérer à grande distance, sous des incidences assez rasantes. Les phénomènes d'absorption limitent l'utilisation des radars à des longueurs d'onde assez basses. De plus, le masquage du terrain par le relief rend certains sites inaccessibles à l'observation.

A l'inverse, les drones hypersoniques peuvent approcher leurs objectifs pour se placer dans les conditions de prise de vue les plus favorables. Les phénomènes d'absorption étant réduits, on pourra utiliser des longueurs d'ondes plus petites, ce qui est à nouveau favorable à la résolution, et diminue ensemble les tailles d'antennes et les puissances installées.

5.2 Équipement ELINT/COMINT

On cherche maintenant à tirer profit de la menace engendrée par la pénétration haute altitude d'un véhicule à grande vitesse. Un tel comportement est supposé mettre en alerte l'ensemble du réseau de défense et, en particulier, les radars de détection, de poursuite et de conduite de tir. Le dispositif embarqué doit remplir les deux fonctions suivantes:

a - localiser les sources non répertoriées:

La mission consiste en un survol d'une région supposée contenir des sites radar en raison de la présence de cibles à haute valeur. Il peut s'agir également de missions à caractère systématique, prenant la forme d'un quadrillage du territoire. Quelques missions effectuées selon des hippodromes permettent de traiter un domaine de 1000 km x 1000 km en survolant chaque point avec un déport latéral maximal modéré. Le système d'écoute doit couvrir le plus grand domaine angulaire possible. Les précisions qui peuvent être atteintes sont directement liées à la taille du porteur, qui détermine les distances maximales entre antennes. Par ailleurs, si on dispose à bord des traitements pour la détection/localisation et de l'imagerie SAR, on peut envisager d'intéressantes synergies.

b - analyser des sources de positions connues:

L'analyse des modes de fonctionnement d'un radar de position connue suppose une capacité à orienter l'écoute sur un secteur angulaire particulier, variable pendant le survol. Les traitements à mettre en place passent par une analyse détaillée des systèmes à écouter. Mieux leurs caractéristiques seront connues à l'avance, plus les informations recueillies seront détaillées:

- fréquence en mode surveillance, cadence des impulsions, puissance, polarisation
- apparition d'un mode de poursuite: distance, recherche de la bande, agilité, puissance
- éventuellement, engagement par une conduite de tir

Une trajectoire bien choisie peut permettre de survoler plusieurs sites en une seule mission.

Le traitement de ces informations permet d'accéder à des informations de haut niveau. Les instants auxquels se produisent les changements de modes renseignent sur les performances du réseau (distance de détection, temps de réaction...) ainsi que sur sa philosophie d'emploi.

5.3 Imagerie IR passive

5.3.1 Généralités

L'imagerie passive dans l'IR exploite les émissions spontanées des constituants de la scène, qui dépendent des matériaux qui les constituent et de leur température. Le principe fonctionne donc de jour et de nuit, avec toutefois des images différentes (fréquentes inversions de contraste thermique), et une très forte influence des conditions atmosphériques.

Les performances des systèmes d'imagerie IR sont principalement caractérisées par leur résolution spatiale (de même qu'en imagerie visible), et par leur résolution thermique. En effet, les images recherchées ressemblent beaucoup à une carte de température, de sorte que les contours physiques des objets n'apparaissent que s'ils témoignent d'un contraste thermique par rapport au fond de scène.

La résolution spatiale dépend de plusieurs facteurs:

a - La turbulence atmosphérique provoque une déviation des rayons lumineux (gradients d'indice de réfraction), qui se traduit par une agitation des images dans le plan focal. Pour des temps de pose courts, elle peut induire des déformations locales de l'image, de sorte que la conformité géométrique peut être dégradée. Inversement, pour des temps de pose longs, ces agitations locales sont moyennées: la conformité géométrique est restaurée, mais le lissage temporel introduit du flou sur les petits objets. Cette turbulence à long terme dépend des caractéristiques de l'atmosphère et peut facilement être modélisée sous la forme d'une fonction de transfert.

b - La diffraction de l'onde incidente sur la pupille crée dans le plan image une tache dont la taille correspond, dans la scène, à la taille minimale des objets qui peuvent être discriminés (indépendamment des autres phénomènes perturbateurs). Cette taille (rayon caractéristique r_c), correspondant à une fréquence spatiale de coupure, est donnée par:

$$r_c = \frac{\lambda \cdot L}{D}$$

où: λ longueur d'onde
L distance de la cible
D diamètre de la pupille

c - L'échantillonnage spatial par la barrette ou la matrice de détecteurs située au plan focal image introduit une perte d'information sur le signal initial: la valeur affectée à un pixel correspond à une moyenne des flux reçus sur la surface du détecteur. La recherche de hautes résolutions passe par l'élaboration de détecteurs de petite taille, et l'emploi de grandes focales.

Ces facteurs de dégradation s'expriment sous la forme d'une fonction de transfert appelée FTM (fonction de transfert de modulation), obtenue par le produit des FTM de chaque phénomène, et caractérise l'atténuation que subit le signal pour une échelle spatiale donnée (souvent représentée sous forme fréquentielle).

La résolution thermique dépend du rapport signal/bruit du système: on cherche à maximiser le nombre de photons provenant de la scène, en sorte de créer un nombre de charge grand devant le bruit propre des détecteurs, en demeurant cependant au-dessous du seuil de saturation. Le nombre de photons est favorisé par une grande pupille, une scène chaude, une faible atténuation atmosphérique, et un long temps d'intégration. Ce dernier doit toutefois être choisi en sorte d'éviter les phénomènes de bougé, qui dépendent de la vitesse du porteur.

Pour une température de scène et des caractéristiques données pour l'atmosphère et le senseur, on peut calculer le NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) pour une bande de fréquences donnée.

Pour représenter la détectabilité des cibles, on utilise le MRTD (différence de température minimale résolue) qui, pour une dimension de cible donnée, détermine l'écart de température qu'elle doit présenter par rapport à son environnement pour être détectée.

Sur la base de ces considérations, on constate rapidement que les limitations de performances ont des origines très différentes en bande II et en bande III.

5.3.2 Cas de la bande III ($\lambda = 8-12\mu$)

Dans cette partie du spectre, on travaille avec des longueurs d'onde assez grandes, pour lesquelles l'effet de la diffraction est très pénalisant. La figure 2 montre les FTM obtenues pour une optique de 1m de focale et une pupille de 200mm de diamètre, en prenant en compte l'échantillonnage et la diffraction.

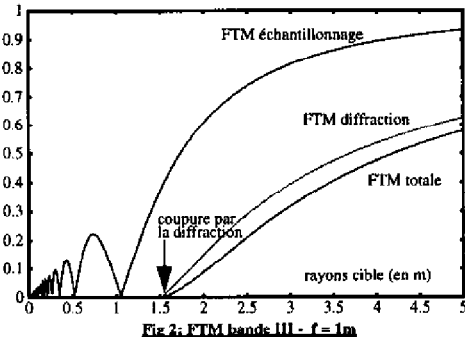


Fig 2: FTM bande III - $f = 1m$

Pour cette pupille, la taille de la tache de diffraction correspond à une cible de 1.5m de rayon. Une résolution inférieure au mètre impose des diamètres de pupilles de l'ordre de 1m, ce qui pose de délicats problèmes d'intégration.

En contrepartie, la scène fournit en bande III une grande quantité de photons, qui permettent de maximiser le rapport signal/bruit des détecteurs avec des temps de pose très courts: les temps d'intégration sont assez faibles pour éviter les effets de bougé sans qu'il soit nécessaire de compenser les mouvements.

5.3.3 Cas de la bande II ($3 \text{ à } 5 \mu$)

Dans cette bande, on travaille avec des longueurs d'onde plus courtes, pour lesquelles les effets de la diffraction sont moins pénalisants. Toutefois, avec une pupille de 200mm, la taille critique d'une cible à 30km est de l'ordre de 1.20m.

Par ailleurs, la bande II fournit moins de photons que la bande III, de sorte que les temps d'intégration doivent être sensiblement accrus si on veut conserver une résolution thermique satisfaisante. À grande vitesse, il peut devenir nécessaire de compenser les effets de bougé pendant le temps d'intégration.

5.3.4 Optique visible et proche IR

En bande visible, on exploite la réflexion de la lumière solaire par la scène. La température de scène n'intervient plus dans les bilans de liaison, et c'est l'éclaircissement qui joue le rôle dominant. Les différentes sources de FTM existent toujours, mais l'utilisation de petites longueurs d'onde réduit très sensiblement les limitations dues à la diffraction.

Un système optique dans le visible devrait répondre au besoin de résolution avec de petites pupilles, mais pas sous l'aspect tous temps, ni la nuit.

5.3.5 Bilan concernant l'imagerie passive

La Bande III semble exclue pour obtenir une très haute résolution à haute altitude sur un véhicule petit. L'IR passif prend tout son intérêt en bande II sur des véhicules capables de recevoir des optiques d'au moins 400mm de diamètre.

La bande visible est utilisable facilement mais se limite aux cas diurnes de ciels dégagés.

Des compléments d'étude demeurent nécessaires pour préciser:

- l'influence des effets aéro-optiques
- les méthodes de balayage (miroirs mobiles, cadence...)
- les besoins de refroidissement pour l'IR

6. Mise en oeuvre opérationnelle

6.1 Modes de lancement

La propulsion par statoréacteur, parfaitement adaptée aux profils de mission comportant une croisière à haut Mach, impose des contraintes dans les phases basses vitesse, car la poussée que peut délivrer le moteur n'est significative qu'à partir d'une vitesse assez élevée ($Mach > 2^+$). Pour atteindre ces conditions de fonctionnement du statoréacteur, on doit mettre en place un moyen d'accélération initial.

La solution d'un accélérateur intégré permet d'exploiter pleinement le volume de la chambre de combustion en la remplissant de poudre. La structure de la chambre doit alors être dimensionnée pour résister aux fortes pressions qui apparaissent dans cette phase. Par ailleurs, les opercules d'entrée d'air doivent être éjectés en fin d'accélération.

Un accélérateur largable permet de s'affranchir de ces deux derniers points (seule la structure du booster est soumise aux fortes pressions), mais le volume alloué à la poudre est plus réduit.

Ces deux concepts sont applicables lorsque l'incrément de vitesse à communiquer n'est pas trop grand (choix des conditions de largage).

Dans le cas d'un tir depuis le sol, la quantité de poudre nécessaire n'est plus compatible avec le volume interne de la chambre, et on utilise un booster externe.

Une alternative aux accélérateurs à poudre peut être offerte par l'emploi d'un mode fusée à effet éjecteur, notamment dans le cas d'un véhicule de grande taille intégrant le réservoir supplémentaire nécessaire. Le reconditionnement après retour de mission pourrait être grandement simplifié par rapport à une solution à accélérateur intégré.

6.2 Récupération de l'engin

La récupération du drone est une phase indispensable pour limiter les coûts.

Classiquement, les senseurs constituent un poste très important, de même que les équipements de navigation. Pour un drone évoluant à très grande vitesse, la structure du véhicule représente également un coût sensible, notamment si des matériaux absorbants radar haute température devaient être mis en place.

La longévité de la chambre de combustion (en nombre de mission réalisable) est plus difficile à estimer, et dépend fortement des technologies mises en oeuvre (puits de chaleur, chambre refroidies...), elles-mêmes liées aux impératifs de trajectoires (flux, durées) et aux dimensions du véhicule.

Il en va de même pour les éléments externes comme les entrées d'air ou les gouvernes, pour lesquelles on conçoit que la récupération pourrait être à l'origine d'impacts locaux sur la structure.

Il est donc certain que l'emploi d'un drone hypersonique, dédié au recueil de renseignements ponctuels à haute valeur, nécessitera d'une part de le récupérer, et d'autre part d'effectuer un certain nombre de contrôles entre deux missions successives.

Plusieurs modes de récupération peuvent être envisagés:

a - retour autonome sur une piste

Pour les véhicules capables d'un décollage autonome, le retour sur piste est une solution naturelle. Cette solution laisse toutefois posés les problèmes suivants:

- contraintes sur la trajectoire, la portée, les manoeuvres finales
- contrôle de l'approche à basse vitesse (efficacité des gouvernes, stabilité, degré d'automatisation...), puis pendant le ralentissement au sol (impact, glissement ou roulement)
- intégration dans le trafic aérien, notamment en vol supersonique

Cette solution serait particulièrement bien adaptée pour un véhicule disposant d'un très grand rayon d'action, peu contraint par la localisation des pistes utilisables.

En revanche, un drone "minimal" ne devrait pas disposer de toutes ces qualités de vol.

b - récupération par parachute

Ce mode de récupération permet a priori de tirer un meilleur parti de la portée du véhicule, car il peut être envisagé dès le retour en zone amie, en s'affranchissant des contraintes sur la localisation des pistes d'atterrissage et les trajectoires d'approche.

Le dimensionnement de la chaîne parachutale et d'un éventuel dispositif d'amortissement sur coussin gonflable est toujours possible, mais il pénalise directement le volume alloué au carburant ou aux équipements.

L'utilisation d'un hélicoptère pour recueillir en vol le véhicule sous son parachute semble un mode de récupération plus avantageux:

- élimination des risques associés à l'impact (senseurs préservés, même peu durcis)
- suppression du problème d'intégration de dispositifs d'amortissement
- le choix du taux de chute, qui ne dépend que des performances de l'hélicoptère et du savoir faire des pilotes, permet de réduire la taille du parachute
- guidage/pilotage rudimentaire en phase terminale (vol rectiligne)
- choix de la zone au sol sans importance (récupération aérienne)
- le recueil en mer ne change rien au procédé

Le système de récupération américain MARS (Mid Air Retrieval System) fonctionnait sur ce principe pendant la guerre du Viêt-nam pour des drones de grande taille largués par un gros porteur DC-130 HERCULES.

La possibilité de prolonger aussi loin que possible le vol aux basses vitesses permet de réduire les spécifications concernant l'ouverture du parachute de freinage. Il est donc utile, même si on ne cherche pas à poser le véhicule sur une piste, d'évaluer le comportement dans ce domaine de vol inhabituel.

6.3 Liaison avec le sol

Les échanges d'information entre un drone et une station de contrôle nécessitent la mise en place d'une liaison de données dont les caractéristiques diffèrent fortement selon le sens du transfert. La station transmet vers l'engin les données concernant la trajectoire et la gestion des modes des senseurs. Ce mode de contrôle est indispensable pour des missions de longue durée (comme la surveillance), notamment si elles doivent pouvoir être reconfigurées. Il s'agit généralement d'une liaison à faible débit.

Inversement, le drone transmet en retour les données issues des senseurs, qui peuvent conduire à des débits très importants, et qui doivent être protégés contre le brouillage (compression des données, étalement du spectre de transmission, antennes directionnelles). Dans le cas de drones réalisant des images en continu, la transmission est une nécessité, car le stockage serait impossible.

Le vol à haute altitude est favorable à une bonne transmission à grande distance, en raison des faibles atténuations atmosphériques. Il est alors possible d'utiliser des fréquences élevées, autorisant l'emploi d'antennes de petite taille. Toutefois, le bénéfice de cette bonne transmission n'est exploité que si la station de réception se trouve également à haute altitude (avion relais, satellite). En revanche, un transfert direct vers le sol ne semble pas possible à très longue portée car les signaux doivent traverser des couches basses de l'atmosphère: ils sont plus fortement atténués, et peuvent être brouillés par un émetteur situé entre le drone et la station sol.

De plus, même dans le cas favorable d'une station aéroportée à 12000m d'altitude (cas d'un gros porteur qui pourrait également constituer la plate-forme de lancement du drone), les portées radioélectriques avec un véhicule évoluant à 30000m sont de l'ordre de 1100km, ce qui peut constituer une limitation d'emploi lorsque de très grandes distances doivent être parcourues. Le transfert par satellite relais s'impose alors, mais il introduit de fortes contraintes géométriques pour assurer le pointage des antennes.

La mise en place d'une liaison de données pose donc un problème assez complexe, couplant très fortement le véhicule (masse, aérodynamique, pilotage) et son concept d'emploi.

6.4 Contraintes sur les trajectoires

Les contraintes opérationnelles imposent généralement une trajectoire complexe, avec au minimum la contrainte d'une récupération en zone amie.

Les grandes vitesses de croisière imposent des rayons de courbures importants, et guident fortement le tracé du profil de mission. Si on fait l'hypothèse simplificatrice selon laquelle un virage sous facteur de charge latéral k accroît la consommation d'un facteur $\sqrt{1 + k^2}$, on constate par exemple qu'un demi-tour à Mach 5 sous 1g de facteur latéral (rayon de courbure de 230 km) accroît de 40% la consommation, pendant les 480 secondes de la manoeuvre, c'est à dire sur 720 km de vol.

Il est donc clair que le rayon d'action est nettement inférieur à la moitié de la portée sur trajectoire rectiligne, et qu'il existe une manoeuvre de demi-tour optimale maximisant la pénétration. Par ailleurs, l'intérêt d'utiliser des trajectoires traversantes en dissociant lancement et récupération est d'autant plus grand que la vitesse est élevée.

7. Conclusion

Dans le domaine des résolutions comprises entre 1m et 30m, les drones actuels ou en projet et les satellites constituent des systèmes complémentaires, pour des missions permanentes de surveillance en zone proche des frontières (menace rapidement variable avec effet à court terme), et l'observation en profondeur de menaces à moyen et long terme (activité de sites, aménagement d'infrastructures).

Toutefois, aucun de ces systèmes ne permet actuellement de recueillir avec de courts temps de réponse des renseignements de type image à des résolutions sub-métriques, ou de type électromagnétique en zone profonde. Par ailleurs, l'écoute des réactions des systèmes de défense lors d'une intrusion ne pourraient être envisagée, par principe, que par un véhicule disposant de fortes capacités de pénétration et d'un long rayon d'action.

Ces missions, qui ne peuvent pas être correctement accomplies aujourd'hui, pourraient être couvertes à coût modéré par un drone hypersonique.

Un radar à synthèse d'ouverture devrait constituer l'équipement de base pour la reconnaissance tous temps. L'emploi alternatif (équipement modulaire) ou bimode (synergie), de l'imagerie passive est également possible, mais son potentiel est limité notamment par le calibre du véhicule, qui fixe la taille maximale des pupilles qui peuvent être intégrées.

Il est vraisemblable qu'un véhicule de taille modérée (6 à 8m), employé sous avion d'arme ou depuis un gros porteur, pourrait offrir, pour le renseignement stratégique, un excellent compromis entre l'adaptation aux besoins opérationnels et les coûts de développements.

Références bibliographiques

- [1] S.A. Hovanessian - Introduction to sensor systems - Artech House 1988
- [2] Donald R. Wehner - High Resolution Radar - Artech House