

## LANCEMENT PAR EXPLOSIF DE PROJECTILES EN HYPERVITESSE.

H.C. Pujols, A. Geille  
CEA/CESTA/ESD  
B.P. n°2  
33114 LE BARP  
FRANCE

### RESUME.

Dans le cadre de l'étude de vulnérabilité de véhicules de rentrée militaires contre diverses agressions, le CEA/CESTA a développé des techniques permettant de lancer des projectiles variés dans le domaine des hypervitesses. On étudie ici l'application de ces techniques à l'impact de débris spatiaux sur des véhicules civils en orbite.

### 1. POSITION DU PROBLEME.

Quatre paramètres couvrent l'essentiel des besoins d'études:

\* la nature du matériau projeté (depuis les roches à densité élevée jusqu'aux matériaux légers utilisés dans les technologies spatiales),

\* la vitesse à atteindre comprise entre 2 et 14 km/s,

\* la masse des projectiles qui varie entre quelques dixièmes de gramme et quelques grammes,

\* le facteur de forme désiré: barreaux, billes ou projectiles plats aisément modélisables.

Le critère de réussite recouvre également la caractérisation du projectile à l'impact sur la cible et sa séparation des objets volants parasites mis en vitesse en même temps que lui en raison de la technique expérimentale utilisée.

### 2. TECHNIQUES DISPONIBLES.

La figure 1 regroupe les domaines masse/vitesse susceptibles d'être atteints avec les techniques développées au CESTA qui sont au nombre de quatre:

- un canon électrique,
- un canon gaz/poudre à 2 étages,
- des lanceurs de jets ultra-rapides,
- des lanceurs mono ou multiétages à explosif.

Parmi ces méthodes nous allons en décrire deux plus particulièrement susceptibles de s'appliquer aux débris spatiaux en raison de leurs performances cinétiques: les générateurs de jets ultra-rapides et les lanceurs mono et multiétages actifs.

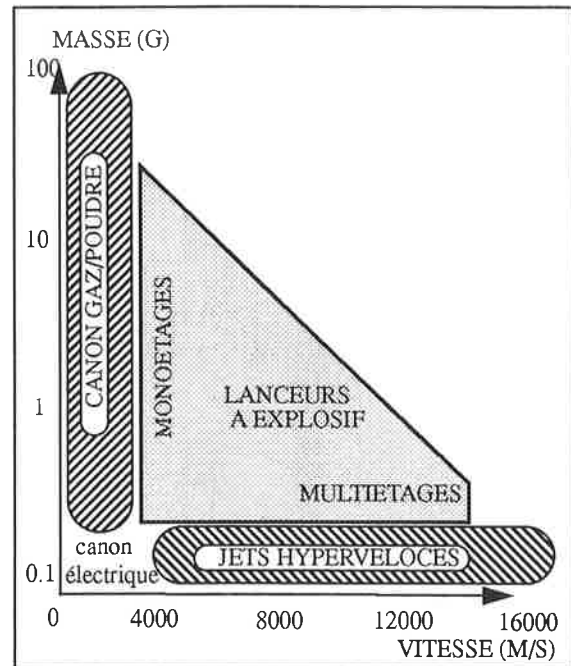


Figure 1. Techniques disponibles au CEA/CESTA.

### 3. JETS HYPERVELOCES.

#### 3.1. Principes.

La création d'un jet de matière hypervélocé à l'intérieur d'une cavité ménagée dans une structure 2D axisymétrique a été décrite dans plusieurs congrès ou rencontres scientifiques (Ref.1).

Rappelons brièvement le schéma de principe (Fig 2) et quelques idées directrices du mécanisme qui se déroule en 4 phases.(Fig 3)

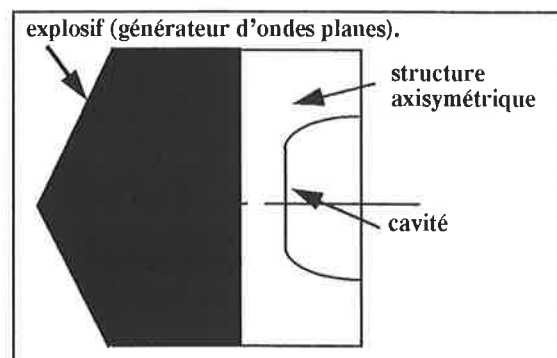


Figure 2. Schéma de principe d'un générateur de jets hypervéloces.

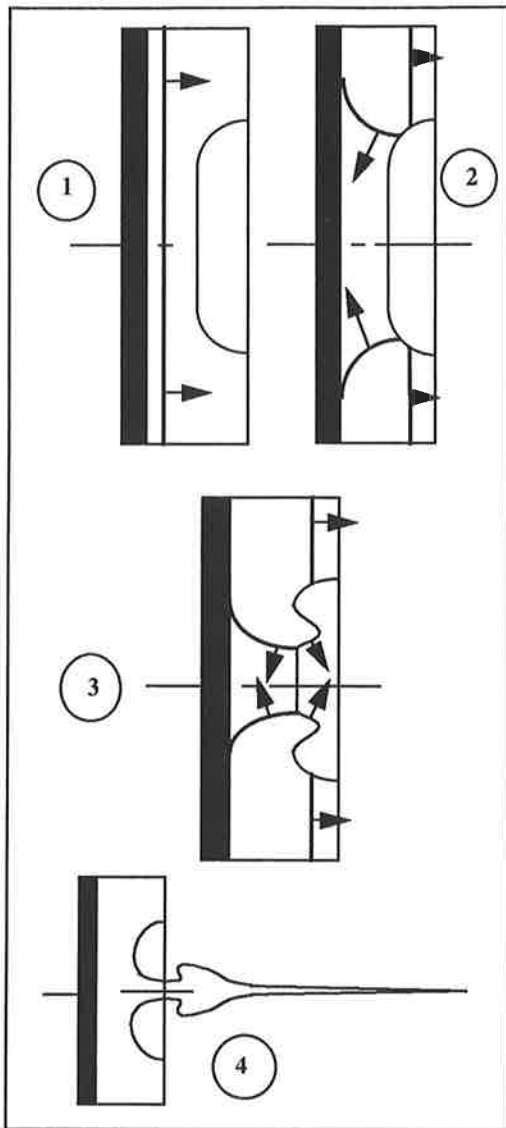


Figure 3. Mécanisme de création d'un jet.

- ①. Le choc incident commence à mettre en mouvement le fond de la cavité.
- ②. Une situation de déséquilibre est engendrée entre le haut de la structure encore comprimé et la zone située près de l'axe voyant déjà les détentes remontant vers l'explosif; une onde de compression centripète se forme.
- ③. En raison de la cartographie des pressions, une vague de matière également centripète se met en mouvement.
- ④. Les 2 phénomènes précédents se focalisent l'un après l'autre sur l'axe créant un jet en deux parties:
  - une partie «lente» et «épaisse» issue de la matière mise en vitesse sur l'axe par l'onde de choc centripète,
  - une partie «fine» et «rapide» due à l'arrivée de la vague de matière qui accélère localement le jet,
  - entre les 2, une zone de transition.

### 3.2. Résultats expérimentaux.

Les termes «lents, épais, rapides, fin» ont évidemment des significations différentes selon la géométrie et la nature des matériaux testés. Parmi les nombreux tirs réalisés depuis la mise au point de ce lanceur, nous en avons extrait trois avec différents matériaux: le cuivre, l'aluminium et le magnésium.(fig 4).

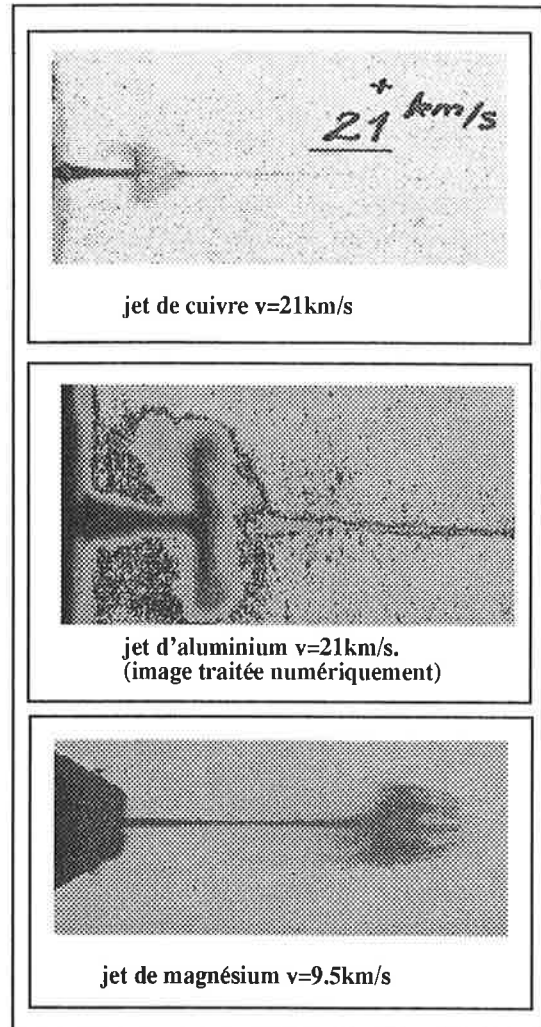


Figure 4. Trois exemples de jets hypervéloces.

### 3.3. Conception des lanceurs.

Ces lanceurs font l'objet d'une conception essentiellement expérimentale, bien que des simulations numériques aient été effectuées en utilisant le code d'hydrodynamique bidimensionnel AUTODYN en simulation eulérienne(fig5). Lors des simulations, la phénoménologie de création des jets est bien restituée, mais il manque au moins deux traitements pour effectuer des prédictions fiables:

- un schéma d'intégration du second ordre,
- des équations d'état multiphases.

D'autres simulations plus précises ont été obtenues en utilisant d'autres codes internes au CEA mais au prix de temps de calcul très longs rendant très difficile toute exploitation en série.(Ref.1)

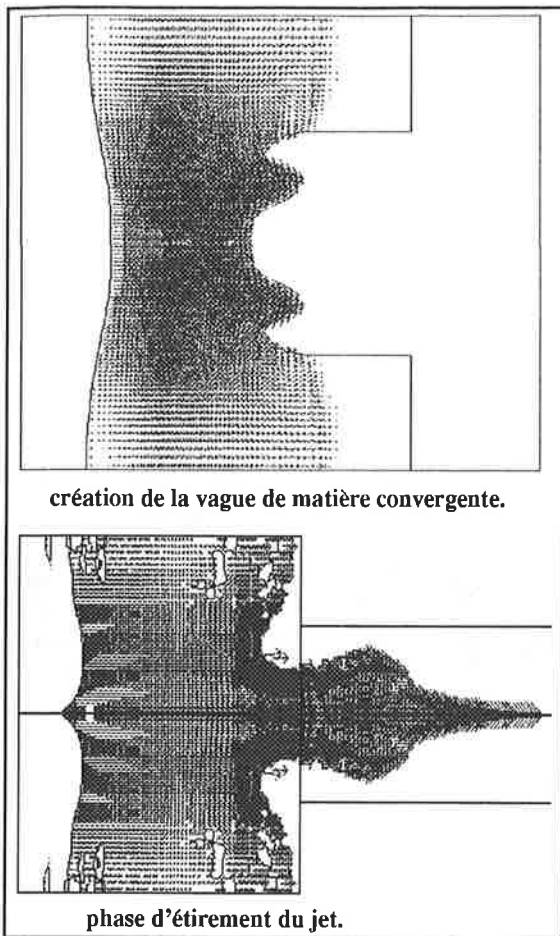


Figure 5. Simulations numériques. Code AUTODYN.

### 3.4. Adaptation au problème des débris.

#### 3.4.1. Facteur de forme.

Le projectile engendré par cette méthode n'est pas utilisable tel quel pour la simulation des débris spatiaux. Il est continu au début du vol et présente un facteur de forme très défavorable. Sa découpe est donc indispensable. Bien que les techniques de soufflage de jets soient connues, elles n'ont pas encore été appliquées ici. Parmi les problèmes à résoudre lors de la découpe figurent l'obtention d'une forme de projectile donnée, sa caractérisation précise et la répétitivité des tirs.

#### 3.4.2. Etat du projectile.

La technique de lancement des jets ultra-rapides n'est pas particulièrement progressive. Le jet est très étiré et vole à des vitesses qui sont fréquemment supérieures à 10 km/s. Dans ces conditions, on peut affirmer que le projectile n'est pas toujours en phase solide, ni homogène (surtout sur les bords et en tête de jet). Il possède cependant un pouvoir perforant redoutable. (jusqu'à 50 cm d'acier).

#### 3.4.3. Mesures.

Pendant son vol, le jet est seul, sans aucun fragment

volant autour de lui ce qui autorise des techniques d'imagerie flash X et caméra image intégrale. Par contre, masses et vitesses doivent être déterminées également par imagerie puisque les techniques d'I.D.L. ne sont pas applicables.

#### 3.4.4. Rusticité. Coût d'exploitation.

Ces lanceurs ne font pas appel à des technologies sophistiquées tel que des générateurs d'ondes calibrés. De plus, la quantité d'explosif mise en jeu est plus faible que dans les lanceurs multiétages, ce qui induit des coûts de tirs plus faibles.

#### 3.5. Suggestion d'emploi.

Compte tenu des remarques précédentes, cette technique est bien adaptée à des tirs où la partie masse/vitesse des spécifications l'emporte sur la partie «facteur de forme» et concernant des matériaux «résistants».

### 4. LANCEURS MONOETAGES A EXPLOSIF.

Ces lanceurs, simples de conception, sont constitués par une cartouche d'explosif cylindrique séparée du projectile à tester par une lame d'air dont le rôle est essentiel pour sa progressivité de mise en vitesse et son faible échauffement (Ref 2).

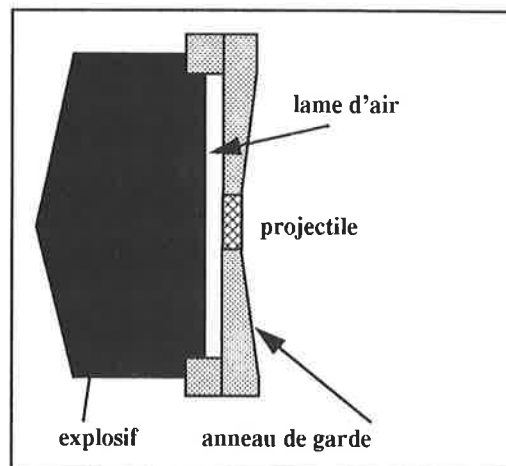


Figure 6. Schéma d'un lanceur monoétage.

Le projectile a la forme d'un disque tenu par un anneau de garde fait du même matériau que lui. En donnant une forme légèrement conique à cet anneau, on obtient un double effet:

- une mise en vitesse divergente des fragments indésirables, ce qui contribue à leur dispersion hors de l'axe de vol du projectile,
- un effet de catapulte améliorant de 15 à 20% la vitesse limite obtenu par rapport à une couronne plane.

Parmi les tirs effectués, des couples masse/vitesse de 1.55g/5.6km/s pour de l'acier ou 0.2g/7.2km/s pour de l'aluminium ont été obtenus, la limite cinétique théorique

se situant vers 8km/s.(Fig 7).

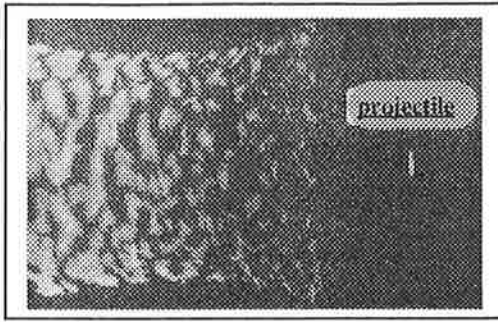


Figure 7. Projectile en vol.

La figure 8 montre une cible d'aluminium après impact du projectile d'aluminium volant à 7.2km/s.

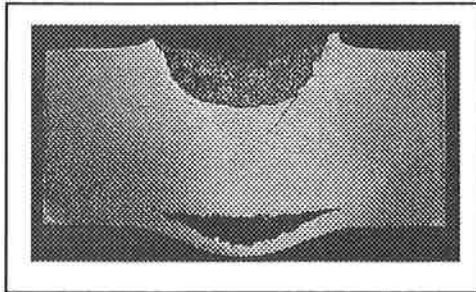


Figure 8. Cible après impact.

## 5. LANCEURS MULTIETAGES.

### 5.1 Principes.

Il s'agit d'utiliser les effets cumulatifs de lanceurs par explosif placés l'un après l'autre sur un même axe. Les projectiles sont des disques plats (ou orthocylindres) de rapport d'aspect variable.(fig 9)

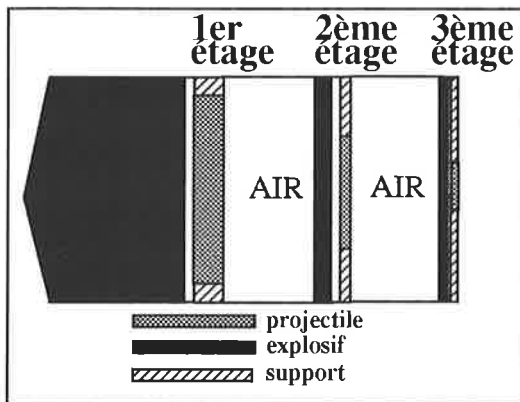


Figure 9. Principe d'un lanceur multiétages.

Sous réserve que la masse surfacique de chaque étage soit plus petite ou voisine de celle du projectile qui l'impacte, il y a amplification de vitesse sans limite théorique. Si, de plus, chaque étage comporte de l'explosif, l'apport d'énergie libéré par celui-ci accélère l'effet d'amplification.

### 5.2 Conception des lanceurs.

Ces lanceurs peuvent se calculer dans leurs principes en utilisant des codes d'hydrodynamique ou à l'aide de codes aux caractéristiques monodimensionnels.(Fig.10)

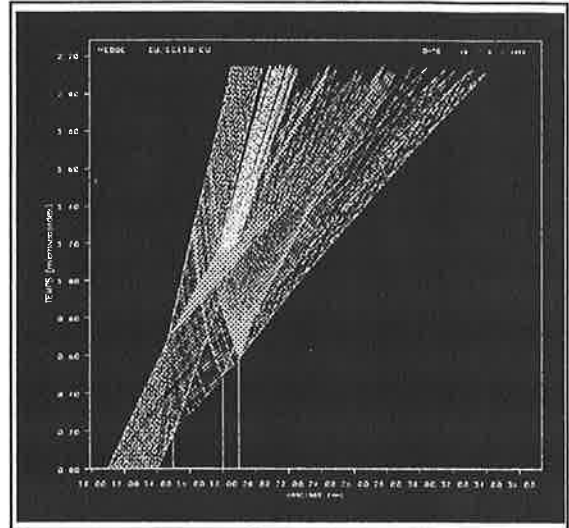


Figure 10. Diagramme de marche obtenu avec un code aux caractéristiques monodimensionnel.

Il existe également des relations de récurrences simples reliant les performances cinétiques des étages entre eux.(Ref.2)

En effet, la vitesse  $U_n$  de projection de l'étage  $n$  est reliée à la vitesse  $U_{n-1}$  de projection de l'étage  $n-1$  par la relation 1:

$$U_n = C_n * U_{n-1} + U_p. \quad (1)$$

-  $C_n$  est un coefficient multiplicatif lié à la géométrie du système et aux densités respectives des matériaux en présence. On s'arrange évidemment pour qu'il soit supérieur à 1 pour qu'il y ait amplification.

-  $U_p$  est un terme d'accroissement de vitesse introduit par l'explosif de l'étage considéré. Il se déduit de la formule de Gurney.

Pour un propulseur à  $n$  étages homothétiques ( $C_n$  est indépendant de  $n$ ), la relation finale donnant  $U_n$  s'en déduit immédiatement:

$$U_n = C^{n-1} * U_1 + U_p * ((1 - C^{n-1}) / (1 - C)). \quad (2)$$

En explicitant la formule 2, on peut montrer que la vitesse atteinte ne dépend que de la masse surfacique du projectile, et donc de son épaisseur (à configuration géométrique donnée).

Les lois de similitude s'appliquent intégralement à ces lanceurs. Cela signifie que si l'on double les dimensions du propulseur, la masse projetée est multipliée par 8 pour une même vitesse.

### 5.3. Résultats expérimentaux.

La réalisation expérimentale de ces lanceurs est délicate, car très sensible à l'environnement technologique.

La planéité de chaque lancement intermédiaire est capitale pour la mise en vitesse du dernier étage. Toute divergence de l'onde de choc, à un niveau ou à un autre c'est autant d'énergie en moins dans le projectile, et autant de risque en plus de le fragmenter au départ.

Pour cette raison, on limite le diamètre du projectile à une fraction de celui de la cartouche (variable selon les matériaux: < 25%).

En combinant des choix judicieux de tailles de cartouches avec des épaisseurs et diamètres variables de projectiles, c'est donc un vaste domaine de masses et de vitesses qui est ouvert avec cette technique, aisément calculable dans son principe.

De nombreux tirs ont été réalisés en utilisant du cuivre, de l'aluminium et plus récemment des matériaux légers tels que le magnésium. Les diagnostics expérimentaux sont habituellement de trois sortes: flash X et I.D.L. pour les mono et quelquefois biétages, et fermetures de contacts chronométriques pour les triétages. (Fig 11)

Les meilleurs tirs ont conduit aux résultats suivants:  
- 2 étages --> 9.5 km/s (9 grammes d'acier)  
- 3 étages --> 13.8 km/s (1.75 grammes d'aluminium).

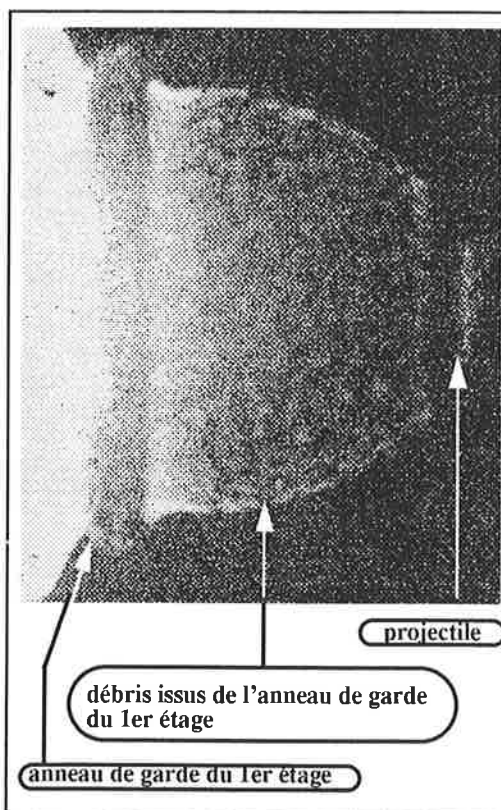


Figure 11. Radiographie X d'un biétage.

### 5.4 Adaptation au problème des débris.

#### 5.4.1. Performances.

La technique des lanceurs multiétages est potentiellement bien adaptée au problème des débris spatiaux puisque les projectiles obtenus sont des orthocylindres de forme variable modélisable, mis en vitesse avec une grande progressivité (apport de chaque étage et présence de lames d'air).

La matière est homogène, non déformée pendant le vol et les projectiles restent solides. Des tirs dans le vide peuvent toutefois être nécessaires sur des vols longs pour éviter des rotations ou freinages intempestifs.

Une grande souplesse est offerte dans la réalisation de l'objectif masse/vitesse mais des problèmes subsistent... et non des moindres.

#### 5.4.2. Séparation des projectiles.

A la différence des jets hypervélocés, une grande quantité de matière est mise en mouvement en même temps que le projectile utile.

Comme pour les lanceurs monoétages, plusieurs techniques permettent de limiter les objets volants indésirables:

- couronne supportant les projectiles de forme conique pour dévier légèrement la trajectoire des fragments,
- pare-éclats inclinés présentant un orifice calibré en fonction du projectile.

Dans le cas présent, on dispose en plus du choix des masses des étages intermédiaires qui permet de profiter au mieux de l'effet «boule de billard»: (arrêt complet d'un étage à l'arrivée sur le suivant et transfert optimisé des quantités de mouvement).

On peut noter un intérêt non négligeable (et inattendu) des milieux intermédiaires actifs, qui se transforment après détonation en produit gazeux sans conséquence sur la cible.

Ces techniques sont toutes employées pour d'autres besoins de CESTA/ESD mais elles n'ont pas encore été appliquées au problème des débris.

#### 5.4.3. Coût des lanceurs.

Ces lanceurs font appel à des technologies sophistiquées et nécessitent une grande qualité de fabrication pour donner leurs meilleures performances. Un générateur d'ondes plane utilisant de l'explosif puissant, sélectionné, et qualifié est nécessaire avec des quantités d'explosifs importantes si l'on souhaite dépasser les 10 km/s. Les coûts correspondant sont donc en rapport avec les performances atteintes.

## 6. AUTRES LANCEURS.

### 6.1. Canon à gaz et poudre (SYLEX).

Ce lanceur modulaire à trois versions permet la projection en version gaz ou poudre de disques de diamètre 110 mm et d'épaisseur pouvant atteindre 15 mm de 0.1 à 2.2km/s. (Ref 3).

Dans sa version bi-étage, des disques de diamètre 50mm et d'épaisseur 5 mm peuvent être accélérés jusqu'à 4.2 km/s. En utilisant un sabot de lancement, des projectiles de l'ordre de la dizaine de grammes et de formes variées (barreaux, billes, disques ou autres) peuvent atteindre 3 km/s.

### 6.2. Canon électrothermique.

Bien que ce type de canon ne fasse pas partie de l'objet de cette communication, on peut citer l'existence à CESTA/ESD d'un lanceur électrique permettant la mise en vitesse jusqu'à 3km/s de billes de diamètre 1 à 2 mm (masses inférieures au dixième de gramme).

Ce moyen est actuellement en sommeil mais il permet la réalisation d'expériences à faible coût.

## 7. REFERENCES.

1.J.P.Leyrat;E.Charvet; H.C.Pujols.Création et simulation de jets hypervéloces.1992 Hypervelocity Impact Symposium.Austin.Texas.U.S.A.17/21 Novembre 1992.

2.H.C.Pujols.Lanceurs hypervitesses a explosif.40ème rencontre de l'Aeroballistic Range Association. PARIS.25/28 Septembre 1989.

3.J.Morvan; J.L.Geffroy; H.Bernier.Le lanceur SYLEX: Description et possibilités. 40ème rencontre de l'Aeroballistic Range Association. PARIS.25/28 Septembre 1989.