

Les airbags puisent leur énergie des boosters d'Ariane 5

Georges Chounet

- Résumé** Une large part des générateurs de gaz pour airbags utilisent un matériau pyrotechnique dont les principes de formulation sont proches de ceux du propergol solide, composite utilisé pour les deux boosters du lanceur Ariane 5. Basé sur le mélange intime d'oxydants solides très stables, avec un polymère réticulable, ces produits se présentent sous forme d'objets monolithes peu sensibles et stables, de 10 à 40 grammes. Leur combustion, initiée électriquement par le choc de l'accident, génère en quelques millisecondes les gaz nécessaires au gonflage de l'airbag.
- Mots-clés** **Airbag, propergol solide, oxydant, polymère, procédé continu.**
- Abstract** **Airbag gas inflators draw their energy from Ariane 5 solid boosters**
A great number of airbag gas generators used a pyrotechnic material issued from solid composite propellant knowledge. Basic rules of its formulation are closed to those of Ariane 5 solid boosters propellant. Using very stable solid oxidizers mixed with a thermosetting polymer, these gas generators take the shape of monolithic grains, quite insensitive and stable, weighing about ten to forty grams. Combustion which is electrically triggered by the road-accident impact generates in some milliseconds, the amount of gas needed to inflate airbag.
- Keywords** **Airbag inflator, solid propellant, oxidizer, polymer, continuous process.**

Abréviations

MPS	moteur à propulsion solide
NOx	oxydes d'azote
OB	« oxygen balance »
PA	perchlorate d'ammonium
PBHT	polybutadiène hydroxytéléchélique
UPG	usine de propergol de Guyane

En septembre 2003, une fusée européenne Ariane 5 assurait avec succès le lancement de la première sonde lunaire européenne, SMART-1. A la même date, les journaux rapportant cette information publiaient une publicité pour un constructeur automobile bien connu de l'hexagone qui présentait ses nouveaux modèles. Cette publicité insistait sur les performances des « airbags » qui lui avaient permis d'atteindre la notation maximum aux tests de sécurité.

Ce jour là, peu de lecteurs se doutaient qu'un lien reliait ces deux événements : dans chacun des deux systèmes évoqués, l'énergie qui assure le fonctionnement du système est apportée par un matériau pyrotechnique de la famille des propergols solides dits « composites » (*encadré 1*).

Le matériau pyrotechnique au cœur du système « airbag » et des boosters d'Ariane 5 est un propergol solide de la famille des propergols composites, du fait qu'il est constitué d'un mélange hétérogène de petites particules oxydantes et réductrices maintenues ensemble dans une matrice à propriété élastomérique désignée sous le nom de liant. Ces matériaux ont longtemps été utilisés dans la propulsion des engins à application militaire.

Pour passer du booster à l'airbag, la formulation du matériau énergétique et le procédé d'obtention ont été

adaptés aux exigences de performance énergétique et de condition d'emploi, de taille des objets et de cadence de production, de coût et de sécurité. Enfin, une installation industrielle spécifique assure ces nouvelles productions.

Qu'est ce qu'un propergol composite ? L'exemple des boosters d'Ariane 5

Les matériaux énergétiques ont une lointaine origine commune, souvent située en Chine, et déjà décrite dans les textes dès le Moyen-Age : la « poudre noire », basée sur le mélange intime dans des proportions à peu près figées depuis longtemps de salpêtre (nitrate de potassium), de soufre et de charbon de bois. On retrouve déjà un élément oxydant majoritaire (nitrate), un élément réducteur carboné (charbon de bois) et un tiers additif « facilitateur » de la réaction (soufre).

Exemple de formulation historique de poudre noire

Salpêtre	Soufre	Charbon de bois
75 %	12,5 %	12,5 %

En 1884, l'ingénieur des poudres et futur académicien Paul Vieille invente les poudres celluloseuses dites « sans fumée ». Basé sur la gélatinisation de la nitrocellulose, ce matériau thermoplastique présente la propriété de « brûler » en couche parallèle. Cette propriété va permettre l'emploi de ces produits pour la propulsion d'engins et fusées, comme on le verra ci-après.

Au début des années 40 furent formulés les premiers propergols composites, à base d'asphalte et de perchlorate

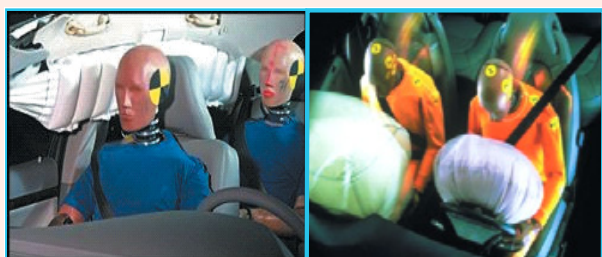
Encadré 1**Boosters et airbags : un même principe**

L'architecture générale du lanceur Ariane 5 est la suivante : deux boosters sont attachés de chaque côté du premier étage cryogénique de la fusée. Ces boosters sont des moteurs à propergol solide (MPS), contenant chacun approximativement 235 t de propergol composite.

Leur durée de fonctionnement est d'environ 2 minutes. Ce temps correspond à la combustion complète du propergol et à la production d'environ 8,2 millions de moles de gaz (ou encore 184 millions de m³ ramenés à 20 °C et à la pression atmosphérique). Le rendement gazeux de la composition est, en effet, de l'ordre de 35 moles de gaz produites par kg de propergol consommé.

Les boosters fournissent environ 90 % de la poussée totale au décollage avec 630 t (6,2 mégaNewton) de poussée maximale produite par chaque moteur. A une altitude de l'ordre de 55 km, vides de tout propergol, ils sont séparés du corps de la fusée et retombent en mer où ils sont récupérés pour expertise.

Ce sont les mêmes principes de génération de gaz que l'on retrouve dans les systèmes « airbags » ayant pour fonction, lors d'un choc violent, de déployer et gonfler des sacs en tissu enduit



mais non étanches, véritables coussins amortisseurs qui protègent partiellement conducteurs et passagers (voir encadré 2).

En effet, au cœur du système, un petit « bloc » de quelques grammes à quelques dizaines de grammes, en matériau énergétique, fournit en quelques dizaines de millisecondes, la quantité de gaz nécessaire pour le gonflage de ces sacs de 10 à 100 litres environ, suivant les applications, frontale ou latérale, avec une surpression instantanée maximum de l'ordre de 200 millibars.

Si l'on parle plutôt ici de générateur de gaz, les principes de formulation et de fonctionnement restent proches de ceux des propergols composites pour propulseur.

Encadré 2**Les sacs pour airbags : des pièces très techniques**

Ces sacs Airbag ne sont pas de simples ballons que l'on gonfle : ils ne sont pas étanches et, à quelques exceptions près, ils se dégonflent presque aussi vite qu'ils se sont gonflés (100 à 200 ms).

Ils ont différents aspects et tailles suivant leur utilisation : 10 litres pour un « airbag latéral », 25 L pour un « airbag rideau »*, 60 L pour un « airbag conducteur » et jusqu'à 150 L pour un « airbag passager ». Ils sont plutôt ronds pour les conducteurs et rectangulaires pour les autres applications.

Diverses astuces sont employées pour en contrôler le déploiement : pliage initial (en Z, en rouleau...), libération de volumes par coutures rompant sous l'effet de la pression, ajout éventuel de « straps » (sangles), etc.

La majorité des toiles utilisées pour les sacs d'airbags est tissée à partir d'un fil de nylon (Polyamide 6.6). Ce fil, constitué lui-même de plusieurs filaments, est calibré en fonction de sa masse linéaire. Un des plus courants est le 235dtex f34, ce qui correspond à un fil dont la masse est de 235 g pour 10 000 m et à 34 filaments. Plus

le fil est gros (470 dtex par exemple), plus le temps de tissage est court : le sac est alors moins cher mais aussi moins étanche. Les sacs peuvent être tissés directement en une seule fois sur un métier (« one piece woven ») ou constitués par différentes pièces cousues entre elles.

Pour améliorer l'étanchéité mais aussi la résistance à la température des gaz, les toiles sont généralement enduites de silicone, en film de quelques dizaines de grammes par m². Le silicone facilite aussi grandement les opérations de découpe et de couture, ce qui réduit leur coût.

* « airbag rideau » : il s'agit d'un nouvel airbag récemment apparu sur les modèles haut de gamme mais qui va certainement se généraliser. Cet airbag se déploie le long des vitres des portières. On le distingue de l'airbag latéral qui est situé dans les montants. Le terme d'airbag rideau (ou airbag-curtain) apparaît ainsi dans des publicités de constructeurs et dans les revues automobiles.

de potassium (KClO₄), oxydant puissant et stable. Réalisé dans des mélangeurs de type pétrin, le mélange était directement coulé à chaud et « moulé-collé » dans la structure métallique des engins. Au début des années 50, l'usage de polymères réticulables, à base de polyuréthane ou de polybutadiène, s'est généralisé. D'une mise en œuvre plus aisée et se prêtant mieux au moulage, ils acceptaient des taux de charge plus élevés et présentaient de meilleures propriétés fonctionnelles (tenue mécanique, combustion, etc.). Dans les mêmes années, le perchlorate d'ammonium (NH₄ClO₄) s'est imposé comme oxydant. Très stable, il offre

un meilleur rendement gazeux, une densité élevée (d = 1,95) et une enthalpie de formation plus favorable.

La propulsion solide : quelques notions générales

L'utilisation de ces matériaux dans la propulsion est basée sur une de leurs propriétés remarquables : les propergols ainsi formulés brûlent (réaction de type oxydoréduction) « en couches parallèles ». Une fois initié en

surface, le front de la réaction de combustion progresse parallèlement à lui-même dans toutes les directions selon une cinétique sensible à la pression et à la température. Cela a deux conséquences immédiates :

1. On peut mesurer une vitesse linéaire de combustion du propergol : cette valeur caractéristique peut s'obtenir sur un barreau cylindrique inhibé sur sa surface extérieure.

2. Cette propriété rend ces matériaux adaptés à la propulsion : à partir d'une surface initiale définie par moulage, on peut prévoir l'évolution de la surface en combustion et calculer le débit massique Q de gaz généré à tout instant, grâce à la relation :

$$Q = \rho \cdot S \cdot V_c$$

avec ρ : densité du propergol, S : surface en combustion et V_c : vitesse de combustion du propergol.

La poussée du moteur est en première approximation reliée au débit gazeux par l'équation :

$$F = Q \cdot V_e$$

où V_e est la vitesse d'éjection des gaz.

Le travail du concepteur de moteur à propergol solide consistera donc, entre autres, à **spécifier un propergol** avec sa vitesse de combustion associée, et à **définir une forme de chargement** (une évolution de surface de combustion) qui permettent d'obtenir une loi de débit et donc une loi de poussée répondant au cahier des charges du lanceur.

Sur le plan énergétique, la performance d'un propergol s'apprécie à travers l'**impulsion spécifique** (I_{sp}), c'est-à-dire la durée, exprimée en seconde, pendant laquelle une unité de masse de propergol produit une poussée unitaire. Elle se mesure sur moteur standard de contrôle et est reliée, au premier ordre, à la composition du propergol par la formule :

$$I_{sp} = K \cdot [T/M_w]^{1/2}$$

avec K : constante, T : température de chambre des gaz de combustion et M_w : masse molaire moyenne des gaz éjectés.

On remarque ainsi que pour la propulsion, la performance énergétique est liée à la quantité et à la nature des gaz fournis par unité de masse de propergol (recherche d'une densité élevée). Elle dépend :

1. De la température des gaz de combustion. **Un critère de sélection des constituants d'un propergol composite est donc l'enthalpie de formation des constituants qui devra être la plus élevée possible** (température de combustion élevée).

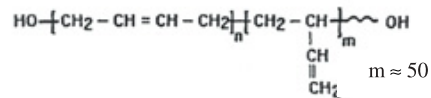
2. **Des espèces formées issues de la réaction d'oxydoréduction (combustion) qui doivent être de faible masse molaire.**

Aujourd'hui, une majorité des lanceurs à propergol solide est basée sur l'emploi des ingrédients suivants :

- **Charges oxydantes** : le perchlorate d'ammonium (PA) de différentes classes granulométriques qui représentent, selon les applications, de 60 à plus de 80 % de la masse totale. Plusieurs répartitions granulométriques sont utilisées pour arriver à ces niveaux de taux de charge et assurer la vitesse de combustion souhaitée. En effet, la granulométrie du PA joue fortement sur la vitesse de combustion du propergol.

- **Charges réductrices** : l'aluminium pulvérisé fin (en valeur moyenne, Φ de 10 à 30 μm). L'aluminium améliore les

• Liant polybutadiène hydroxytélechélique



• Réticulation par un polyisocyanate

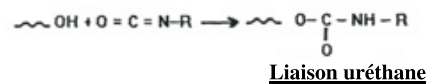


Figure 1.

performances énergétiques (température de combustion, densité), mais n'est pas systématiquement employé.

- Un *liant organique réducteur* dont le constituant principal est un polybutadiène fonctionnalisé par des fonctions hydroxyles, le PBHT (polybutadiène hydroxy-télechélique, $M_w = 2\,800$, fonctionnalité moyenne en hydroxyle = 2,5) réticulé avec un di-isocyanate (figure 1).

Le *tableau I* donne les formules chimiques et les performances de différents oxydants comparées à celles du perchlorate d'ammonium.

Tableau I - Performances de différents oxydants.

Oxydant	Oxygène libéré (% en masse)	Rendement gazeux hors oxygène (mole/kg)	Température de fusion (°C)	Enthalpie de formation (kJ/mole)
NH_4ClO_4	34	17	décomposition ≈ 500	- 295,2
KClO_4	46,2	0	610	- 433,0
NaNO_3	47	6	307	- 470,0
KNO_3	39,6	5	334	- 496,5
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	37,8	5	570	- 977,3

A titre d'illustration, on peut voir dans le *tableau II* les grandes lignes de la composition des MPS d'Ariane 5. Avec des charges « monodispersées », le taux de charge volumique maximal accessible se situe aux environs de 60 à 65 %. Le taux de charge volumique recherché de près de 75 % ne peut être atteint que par l'assemblage de plusieurs « répartitions » granulométriques. Généralement, on retrouve trois familles granulométriques dans un propergol, l'objectif étant de se rapprocher d'un empilement de type « appolonien » (figure 2).

La société SME produit industriellement le PA utilisé sur les MPS d'Ariane 5. La dernière étape du procédé de production est une étape de cristallisation menée en réacteur agité. La cristallisation a été réglée pour produire une coupe granulométrique centrée sur 200 μm et présentant un assez large spectre. D'autres coupes granulométriques sont obtenues par broyage. Dans la composition des MPS, seules deux classes granulométriques ont été retenues, en particulier pour des raisons économiques. Le *tableau III* donne quelques performances calculées de cette composition.

La fabrication du propergol nécessite donc de mélanger le liant avec l'ensemble des charges. Cette opération se fait dans un malaxeur équipé de trois pales à axe vertical

Tableau II - Composition des MPS d'Ariane 5.

	Fonctions	Produits	Taux massique (%)	Taux volumique (approché, %)
Éléments du liant	polymère	PBHT : polybutadiène fonctionnalisé (fonction hydroxyle)	14	26,8
	réticulant	Di-isocyanate (cf. schéma réactionnel ci-dessus)		
	plastifiant	Di-octyl azélate		
	agent d'adhésion liant chargé catalyseurs de réticulation	Composé avec motifs aziridine 2 catalyseurs associés		
Charges	oxydant	<u>PA brut de cristallisation</u> : Φ médian = 200 μ	57,8	64,2
	réducteur	<u>PA fin broyé</u> : Φ médian = 10 μ Aluminium pulvérulent	18	9,0
Additifs	accélérateur de la combustion	Oxyde ferrique	0,2	

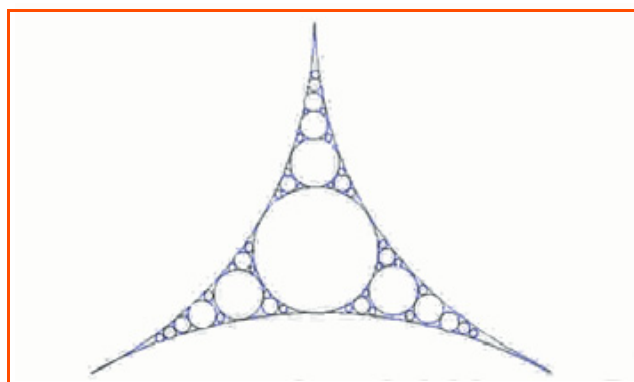


Figure 2 - Exemple de l'empilement appolonien. L'empilement d'Appolonios (200 ans av J.-C.) vise à paver le plan aussi complètement que possible (cf. Duran J., *Sables, Poudres et Grains*, Eyrolles Sciences, 1997).

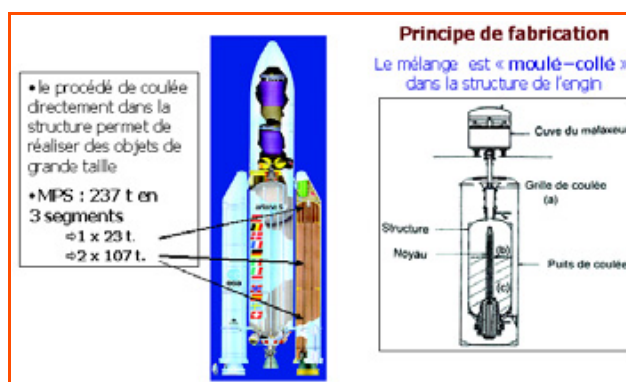


Figure 3 - Principe de fabrication du propergol. Remarque : le schéma du moteur dans le puits de coulée ne correspond pas à celui d'un segment de MPS.

Tableau III - Quelques performances de la composition des MPS d'Ariane 5 (à 45 bars).

Température de combustion	Densité	Impulsion spécifique adaptée	Rendement gazeux	Principales espèces formées
3 380 °K	1,758 g/cm ³	260 s (détente 45/1)	35,5 moles/kg	H ₂ , CO, H ₂ O, HCl (balance en oxygène : - 35 %)

tournant à vitesse lente. La géométrie des pales et le mouvement de la tête sont tels qu'à l'issue d'un cycle complet de rotation de la tête qui supporte les pales, il n'y a pas de zone de la cuve non « balayée » par les pales. Une fois obtenue une pâte macroscopiquement homogène, le propergol est versé, sous un vide partiel, entre la structure du moteur (sorte de réservoir le plus souvent métallique), protégée par une protection thermique, et un noyau central. Le propergol ainsi **moulé-collé** à la structure est lentement réticulé (figure 3). En fin d'étape dite de « cuisson », le noyau est extrait.

Lors de l'allumage, le propergol va s'initier sur l'ensemble de sa surface libre. Le front de flamme va alors progresser de l'intérieur vers l'extérieur à une vitesse caractéristique du propergol spécifiquement formulé pour l'application. Dans le cas des MPS d'Ariane 5, l'épaisseur à brûler est de l'ordre du mètre, la vitesse de combustion est d'environ 7,5 mm/s

à la pression de fonctionnement proche en moyenne de 4,5 MPa.

Développement d'un propergol pour les systèmes airbags

Le développement de la technologie et du marché des airbags a permis aux « propergolistes » de développer de nouveaux matériaux. Les pyrotechniciens qui se sont lancés dans cette activité l'ont abordée avec leur culture propre. SME s'est appuyée sur sa connaissance des propergols composites pour proposer à son partenaire industriel Autoliv une composition adaptée. Cependant, la nature de l'application avec un effet énergétique limité à la génération « instantanée » de gaz et le passage de l'échelle des MPS à la fourniture d'unités de quelques dizaines de grammes ont imposé une révision profonde des formulations et du mode production.

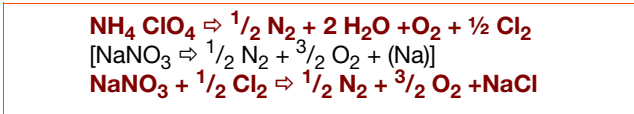
La formulation

Il serait trop long de détailler ici l'ensemble des spécifications d'une formulation pour airbag. Citons en quatre principales :

- une vitesse de combustion élevée qui assure le gonflement d'un sac airbag dans un temps n'excédant pas 40 ms pour les plus gros (airbags « conducteur » et « passager ») ;
- une non-toxicité des gaz qui s'exprime, en plus de stricts interdits, par une limite sur les taux de CO et de NOx, émis lors de la combustion ;
- un fonctionnement assuré entre - 35 et 85 °C et une tenue de 15 ans en vieillissement et en cyclage dit « Arizona » (simulation des conditions extrêmes qui règnent dans ce désert). Cette spécification est traduite, par les constructeurs, en une tenue de 400 heures à 107 °C ;
- une température de combustion modérée et un taux réduit de particules dans les gaz émis.

La constitution de la formulation développée reste basée sur l'emploi de charges oxydantes dans une matrice réductrice de type organique. Ainsi :

● Le perchlorate d'ammonium a été conservé comme oxydant majoritaire pour ses vertus décrites plus haut : bonne combustion, possibilité de réglage de la vitesse de combustion, grande stabilité thermique, disponibilité et coût. Il est associé à un 2^e oxydant, le nitrate de sodium, qui a pour fonction de neutraliser le chlore selon le schéma réactionnel suivant :



L'efficacité de la neutralisation est attestée par la mesure de composition des gaz.

● Pour le liant, le choix s'est porté sur le silicone pour sa bonne tenue en température (à froid et à chaud) (figure 4)

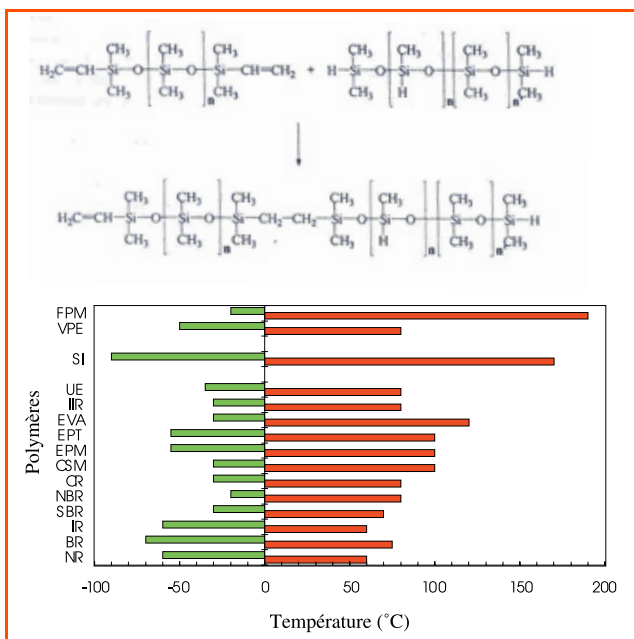


Figure 4.

et sa teneur en oxygène (voir ci-après). Le silicone est connu en pyrotechnie pour donner des combustions vives et est adapté à l'extrusion.

L'aluminium a été éliminé pour des raisons évidentes (température, particules, etc.).

Le dosage entre les ingrédients de la formulation doit permettre de respecter la spécification concernant la teneur en CO et NOx des gaz de combustion. Cela nécessite d'assurer un équilibre entre espèces oxydantes et réductrices : les espèces oxydantes doivent être en quantité suffisante pour oxyder tous les carbones en CO₂, mais un excès d'oxydant amène la formation d'oxydes d'azote. Cette exigence n'existe pas en propulsion, sous cette forme tout du moins, où l'optimum énergétique reste prioritaire.

La définition d'une formulation et l'ajustement des taux nécessitent l'usage intensif d'un code de thermodynamique qui donne, à partir de la formulation du matériau, divers éléments sur la réaction (enthalpie, température, etc.) et la composition des gaz.

La règle d'une « balance en oxygène » (OB) équilibrée impose, en fonction des oxydants retenus, un taux de charge global (figure 5), qui n'est pas accessible dans tous les cas. De ce point de vue, les polymères silicone de type PDMS avec la répétition du motif à un oxygène, -[(2Me)Si-O-], présentent un avantage.

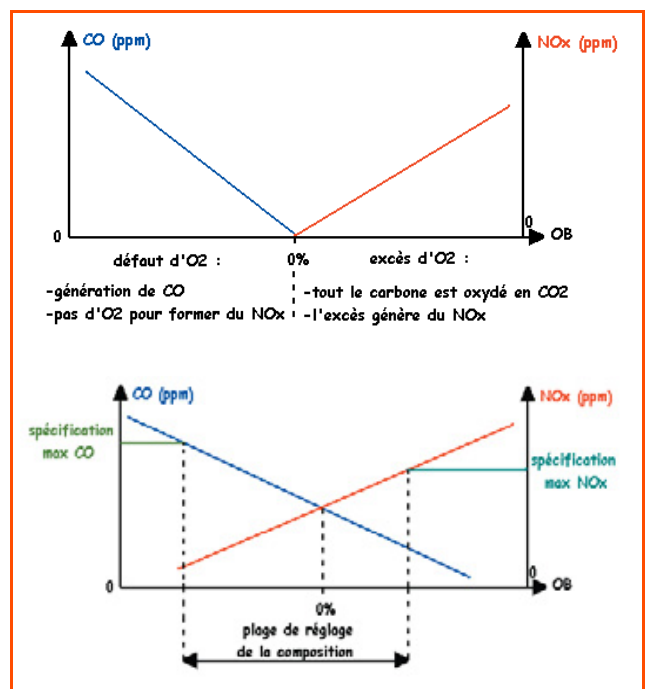


Figure 5.

Le procédé continu

Qui dit « temps de combustion très court » dit aussi « épaisseur de propergol à brûler » très faible. Dans le cas des MPS d'Ariane 5, on a vu que la couche de propergol était de l'ordre du mètre. Ici, avec un fonctionnement à haute pression de l'ordre de 20 MPa et des vitesses de combustion de l'ordre de 50 mm/s, pour obtenir un temps de combustion de l'ordre de 40 ms, l'épaisseur de propergol ne doit pas excéder $0,04 \times 50 = 2$ mm. L'épaisseur du voile de propergol est alors de 4 mm (encadré 3).

Éléments de sécurité

La sécurité est une préoccupation première dans la production et l'emploi de tels matériaux. Les propegols composites sont des matériaux par nature assez peu sensibles aux sollicitations, qu'elles soient de type choc ou frottement. Ils ont une température d'initiation supérieure à 200 °C, mais présentent par contre une certaine sensibilité au frottement entre pièces métalliques (frottement métal-métal).

Ils brûlent bien à l'air libre et ne présentent pas de risque autre que l'incendie. Par contre, une prise en feu en milieu confiné provoquera une explosion pneumatique dont la violence sera liée à la résistance de l'enveloppe.

La fabrication de ces matériaux est toujours conduite à distance. Les unités de mélange (de type malaxeur ou bivis), sont placées dans des bâtiments aux murs bétonnés et dimensionnés, en fonction de la capacité de l'équipement, pour résister à un événement majorant. De ce point de vue, l'emploi de mélangeur continu qui limite les quantités mises en œuvre dans l'unité de malaxage permet de réduire les « zones de danger » et d'alléger le dimensionnement des bâtiments (épaisseur des murs, dimensions des locaux). La conception et l'exploitation d'installations pyrotechniques sont régies par le décret 79-846 du 28/09/1979, complété par l'arrêté du 26/09/1980 fixant les règles d'isolement des installations pyrotechniques.

Au niveau des équipements de mélange, ils sont conçus pour permettre un déconfinement instantané de la matière en cas de prise en feu (principe de parois localement minces).

En ce qui concerne les conditions d'emploi du mélangeur continu bivis, la vitesse de rotation des vis est limitée pour réduire les risques liés aux frictions entre vis, ou entre vis et fourreau, et le débit matière reste faible (de l'ordre de 100 kg/h) en comparaison de ce qui se pratique dans les industries utilisant ces outils (agroalimentaires, plasturgie, etc.) pour éviter de forts échauffements.

Des systèmes de sécurité sont aussi présents sur l'ensemble de l'installation depuis les introductions des constituants (blocage des écrous, tamisages, détections de particules...) jusqu'à l'outil lui-même (parois fragiles de déconfinement, limiteurs de pression de bridage du convergent, ouverture automatique du fourreau, etc.). **La sécurité est une préoccupation majeure dans ce type de production.**

Tableau IV - Quelques données industrielles du marché des airbags. Cette production couvre environ 25 % du marché mondial des générateurs airbags.

1996	2003	Production	
Démarrage de la première ligne industrielle	3 lignes de production avec une capacité de plus de 500 t/an	150 millions de blocs produits à ce jour avec cette technologie	soit 1 400 t de propegol produit

La concurrence et les évolutions futures

Pour aborder ce marché, SME a exploité ses compétences dans le domaine des propegols composites pour moteurs-fusées. Ses principaux concurrents ont en majorité opté pour des solutions plus proches de la pyrotechnie traditionnelle basée sur la mise en œuvre de produits pulvérulents et une mise en forme par pastillage. Dans ce cas, le petit bloc de propegol extrudé est remplacé par un empilement de petites pastilles (quelques centaines). Cette technologie moins performante en terme de maîtrise de la combustion, et donc du débit gazeux, permet cependant au formulateur de réduire le taux de liant carboné au strict nécessaire à la cohésion d'une pastille, voire de le supprimer dans certains cas (tenue de la pastille par frittage). Ceci est un avantage.

Les études s'orientent donc aujourd'hui vers la mise au point de technique d'extrusion sous eau avec des liants hydrosolubles en faible taux et l'emploi de charges à fort taux d'azote.

Encadré 3

Les objets réalisés sont des petits blocs qui brûlent à partir des deux faces. L'épaisseur de voile de propegol est alors de l'ordre de 4 mm. Le matériau étant de type composite, sa mise en œuvre passe par une étape de mélange et une étape de mise en forme-moulage.

Compte tenu de la forme des objets et des cadences de production à assurer, un procédé de mélange en continu couplé à une mise en forme par extrusion a été retenu. Dans ce but, le liant a été formulé afin d'obtenir après mélange une pâte therm durcissable de consistance suffisante pour être extrudée. En sortie de la filière d'extrusion, la composante élastique du matériau est assez forte pour éviter tout fluage de l'extrudat qui conserve ainsi la forme de la filière.

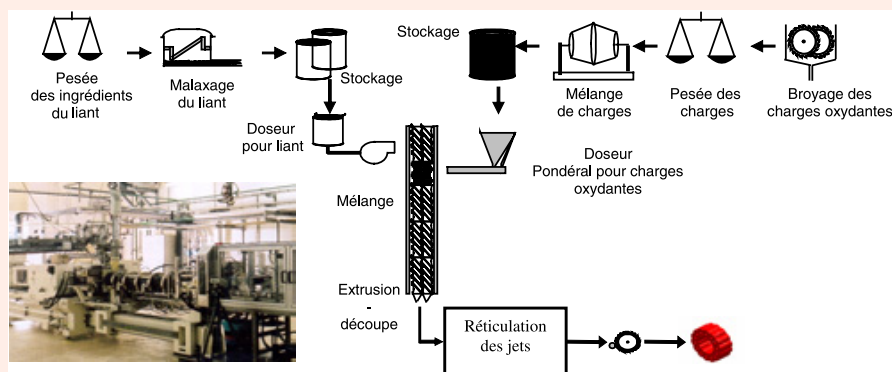


Schéma du procédé.



Conclusion

Pour assurer la propulsion au décollage du lanceur Ariane 5 par des moteurs à propergol solide, le choix s'est porté sur une composition de propergol composite. De conception éprouvée, cette composition est mise en œuvre par un procédé traditionnel basé sur l'emploi de malaxeurs de grande taille et en limite de la technologie. La nouveauté est venue, entre autres, de l'extrapolation réalisée sur la taille des moteurs et des équipements utilisés sur le site de production en Guyane.

A l'autre bout de l'échelle, c'est aussi un propergol composite, mais spécifiquement formulé, qui a permis de répondre aux différentes spécifications requises par la génération de gaz pour airbags. La formulation a du être revue pour tenir compte d'exigences éloignées des performances propulsives traditionnelles et s'adapter à une production continue de type « grande série ». Le matériau pyrotechnique a démontré, à travers cette application, des potentialités qui étaient réservées jusque-là à des applications limitées et spécialisées.

Le succès de cette application du matériau pyrotechnique dans le domaine « grand public » montre tout l'intérêt de cette technologie, en particulier pour des applications de sécurité.

Bibliographie

- Charrette D., Chounet G., Giraud E., 8^e Congrès international de pyrotechnie Euro Pyro 2003, Le procédé continu : une voie industrielle pour de nouveaux propergols, *Actes du congrès*, juin 2003.
- Conkling J.A., *Chemistry of Pyrotechnics. Basic Principles and Theory*, Marcel Dekker Inc., New York, 1985.
- Davenas A. et col., *Technologie des Propergols Solides*, Masson, 1989.
- Giraud E., Chounet G., Tautzia J.-M., Apports de la rhéologie et de la simulation numérique à la mise au point des procédés de fabrication, *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 1997, 3 (37), p. 113.
- Tautzia J.-M., L'évolution de la technologie de production des matériaux énergétiques, *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 1997, 3 (37), p. 133.
- Vidal M., Les propergols solides à usage civil, *Techniques Avancées*, 1998, 42.



Georges Chounet

Ingénieur centralien et docteur-ingénieur, il est responsable de l'unité Matériaux-Technologies* au sein de la société SME Propulsion (Groupe SNPE).

* SME, unité MT, Avenue Gay-Lussac, 33167 Saint-Médard-en-Jalles Cedex.

Tél. : 05 56 70 52 13.

Courriel : g.chounet@snpe.com

Depuis 1988
Les Editions D'Île de France

Expérience,
la différence

PUBLICATION
RÉGIE PUBLICITAIRE
EDITION
FINANCEMENT

Notre société est spécialisée dans l'édition d'annuaires et de revues professionnelles pour sociétés savantes, associations d'anciens élèves d'écoles d'ingénieurs, fédérations professionnelles,...

Notre présence depuis plus de 17 ans dans un secteur d'activités en mutation permanente, la transparence de nos résultats régulièrement positifs depuis la création de notre société, la fidélité de nos partenaires éditoriaux sont autant de preuves du professionnalisme de notre équipe et constituant de fait notre meilleure « carte de visite ».

Notre atout majeur, et c'est aussi notre spécialité, est de vous garantir la gratuité de vos ouvrages papiers en contrepartie de l'exclusivité de la régie publicitaire entièrement assurée par notre service commercial.

Régisseur exclusif
de la Revue
l'Actualité Chimique

Editions D'Île de France
102, avenue Georges Clémenceau • 94700 Maisons-Alfort
Tél. : 33 1 43 53 64 00 • Fax : 33 1 43 53 48 00
e-mail : edition@edif.fr

www.edif.fr